

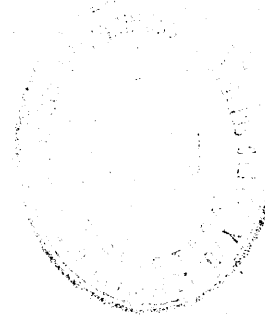
112-C-68

R-58

D. 810

Universidad Politécnica de Madrid

T E S I S



SECADO DE LODOS DE AGUAS RESIDUALES POR FILTRA  
CION-EVAPORACION NATURAL. - ERAS DE SECADO -

por

Jose' Rubió Bosch

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos  
Canales y Puertos

Madrid, Septiembre 1.976

R E S U M E N

=====

El trabajo se ha planteado, como la recopilación de los datos obtenidos por el autor en el transcurso de cinco años de contacto diario con la Explotación y Mantenimiento de Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales del Excmo. Ayuntamiento de Madrid, al corresponderle la responsabilidad de dirigir la empresa contratista de dicho Servicio. Después el planteamiento ha derivado a un trabajo de investigación, tanto en el laboratorio, como sobre modelos reales.

La finalidad era la de mejorar la explotación y suministrar al proyectista parámetros, para la correcta definición de un elemento importante dentro de una instalación de depuración. Las limitaciones del trabajo son las que imponen la investigación de un fenómeno en dependencia directa de las condiciones climatológicas. Por otra parte la lógica, aunque no aconsejable, benevolencia con la que juzgamos nuestras propias aportaciones originales a un tema. La autocrítica y la autolimitación es, difícil, pero se ha procurado aplicar al máximo.

Las conclusiones más relevantes pueden ser:

- Fijar la granulometría del filtro en una talla efectiva, entre 0,2 y 0,4 mm. y un coeficiente de uniformidad menor de cuatro.
- Determinar que la velocidad de drenaje oscila entre 4 l/m<sup>2</sup>. hora las primeras 8 horas y 1 l/m<sup>2</sup>. hora las restantes.
- Se ha relacionado el secado de sólidos en procesos industriales, con el secado de lodos en eras.
- Se ha determinado que para una zona parecida climatológicamente a Madrid el número de ciclos de secado es de 12 por año.
- Se han obtenido fórmulas teóricas, que nos dan la reducción de volumen y el tiempo de duración de un ciclo de secado en unas condiciones climatológicas dadas.

A G R A D E C I M I E N T O

=====

- Al director de la tesis.
- Al Excmo. Ayuntamiento de Madrid, en cuyas Depuradoras ha realizado los ensayos.
- A la empresa en que presto mis servicios por las facilidades dadas para realizarla.
- A las personas que han colaborado en los ensayos.
- A la Escuela de Ingenieros de Caminos, por el espiritu de superación que me inculcó en su día.
- A mi familia.



## I N D I C E

	Pagina
1. INTRODUCCION	2
PRIMERA PARTE.- PRESENTACION GENERAL	
2. SECADO DE LODOS	
2.1. Introduccion	8
2.2. Definiciones y Teoria General	8
2.2.1. Lodos	8
2.2.2. Constitucion de los lodos	8
2.2.3. Caracteristicas de los lodos	9
2.2.4. Procedencia de los lodos	11
2.2.5. Cantidades de lodos	12
2.2.6. Manipulacion de los lodos	14
2.3. Deshidratacion de los lodos	17
2.3.1. Filtracion. Leyes Generales	19
2.3.2. Filtracion superficial	19
2.3.3. Filtracion profunda	22
2.3.4. Filtracion de lodos	26
2.3.5. Transmision de calor. Leyes Generales	30
2.3.6. Centrifugacion	43
2.3.7. Otros sistemas	44

2.4. Metodos de secado de lodos	45
2.4.1. Naturales	45
2.4.2. Filtración mecánica	47
2.4.3. Centrifugación	57

## SEGUNDA PARTE.- ERAS DE SECADO

### 3. REVISION DE BIBLIOGRAFIA SOBRE ERAS DE SECADO

3.1. Introducción	62
3.2. Eras de secado	62
3.2.1. Definición	62
3.2.2. Descripción del proceso	63
3.2.3. Forma de las eras	65
3.2.4. Granulometría de la masa fil - trante.	67
3.2.5. Superficie necesaria	68
3.2.6. Humedad de los lodos	70
3.2.7. Retirada de lodos secos	72
3.2.8. Otros factores a considerar	74
3.3. Conclusiones	75

### 4. DETERMINACION DE LOS PARAMETROS FUNDAMENTALES DEL DIMENSIONADO DE ERAS DE SECADO.

4.1. Introducción	79
4.2. Descripción del proceso.	80
4.2.1. Volúmen de lodos.	80
4.2.2. Conducciones de lodo y llenado de eras.	82
4.2.3. Separación por flotación de <u>só</u> lidos.	84.

4.2.4. Filtración	85
4.2.5. Evaporación	86
4.2.6. Retirada de lodos	89
4.2.7. Renovación del filtro	90
4.3. Determinación de parámetros	91
4.3.1. Introducción	91
4.3.2. Dimensiones de la era	92
4.3.3. Granulometría del filtro	93
4.3.4. Reducción de volúmen	99
4.3.5. Factores climatológicos	110
4.3.6. Humedad de los lodos	112
4.3.7. Cálculo teórico del ciclo de secado.	117
5. CONCLUSIONES	121
6. BIBLIOGRAFIA	125
7. A N E X O S	
Nº 1 Ensayos y calculos de laboratorio.	
1.1. Introduccion	130
1.2. Ensayo de secado en laboratorio	130
1.3. Ensayo de seguimiento de reducción de volúmen de los lodos vertidos a una - era de secado.	141
1.4. Ensayos para la determinación de <u>hume</u> dades y sólidos de filtrado.	153

1.4.1 Seguimiento de secado de lodos en eras experimentales.	153
1.4.2. Seguimiento de sólidos de <u>fil</u> trado en eras experimentales.	157
1.4.3. Seguimiento de secado de lodos en eras de la estación depura- dora de El Pardo y Manoteras.	158
1.5. Ensayos de determinación de velocidad- des de filtración.	159
Nº 2 Ensayos de granulometría de arenas.	
2.1. Introducción	168
2.2. Definición de parámetros	168
2.3. Método de ensayo.	169
2.4. Resultados	171
Nº 3 Datos climatológicos	
3.1. Introducción	201
3.2. Cuadro, resúmenes y curvas	201

# 1. I N T R O D U C C I O N

=====

## 1. INTRODUCCION

=====

La depuración de las aguas residuales es una necesidad del genero humano, para conservar el equilibrio del "ecosistema" de los seres vivos en la naturaleza.

El agua es un medio finito y por tanto hay - que administrarlo. Hasta este siglo el problema podía ser el abastecimiento. Los avances tecnológicos, permiten transportar el agua hasta los nucleos urbanos - desde puntos muy alejados y con grandes variaciones de cotas topográficas.

El paso siguiente a considerar es la calidad del agua que se proporciona al usuario. De esta necesidad nace la tecnología del Tratamiento del Agua. Se consiguen correcciones de las características físicas y químicas del agua de forma que aguas de muy mala calidad, se pueden transformar en aceptables, siendo el, prácticamente único, factor económico el que limita - la aplicación de los procesos.

Una vez el usuario ve colmadas sus necesidades olvida generalmente, que el agua la devuelve al medio con materias que deterioran su calidad. Se ha producido la CONTAMINACION del agua.

El incremento de consumo va ligado al grado de desarrollo y en cierto modo al de concentración urbana. Se presenta pues, el problema de grandes masas de agua contaminada que deteriora las corrientes de - agua que sirvan para usos posteriores. La contaminación del agua es un problema que afecta al medio de - una forma considerable y por tanto se desarrolla, una tecnología que pueda corregir este desequilibrio. Nace pues la Depuración de aguas residuales e industriales.

En sus inicios se resume a simples depuraciones físicas, decantaciones, que se muestran insuficientes o muy costosas y se trabaja en la investigación de otros campos. Se recurre a la corrección química, floculación, pero el enorme costo hace que se siga investigando y nace la depuración biológica. La combinación de los tres métodos, físicos, biológicos y químicos, es la base de la depuración de las aguas contaminadas. Esta consiste en esencia en eliminar los sólidos incorporados a ella y en reajustar el equilibrio de oxígeno necesario para que exista la posibilidad de vida en ella.

La eliminación de los sólidos, se consigue por medio de una separación, física o química, del medio acuático, en forma de un concentrado con un alto porcentaje de humedad. Es decir una vez, separados los sólidos del agua, hay que disponer el sistema de eliminar el concentrado resultante.

Las alternativas que se presentan son simples. Una es conseguir un secado que los haga manejables e incluso reutilizables, otra el vertido a grandes masas de agua, una vez estabilizadas (materia inerte). Esta última alternativa no parece recomendable ya que para conseguir, su total estabilización, es un proceso muy difícil y siempre estaremos aportando, materia contaminante.

Llegamos pues, a la alternativa de secar una materia que se encuentra diluida, en una cantidad casi siempre inferior al ocho por ciento. Las técnicas son variadas y pasamos desde la incineración, hasta el secado natural, producido por la evaporación solar y el filtrado en lecho de arena (ERAS DE SECADO)

Este último método, aunque el más primitivo y simple, ofrece un claro campo de aplicación, para núcleos de población pequeños y más en una nación de clima muy soleado. Al iniciarse las técnicas de depuración de aguas residuales, el secado de lodos se hacía prácticamente, por eras de secado. Posteriormente se fué mejorando las técnicas de secado, introduciendo elementos mecánicos que provenían de procesos industriales donde la separación sólido-liquido, era una parte esencial del proceso de fabricación. Métodos como la filtración mecánica por aplicación de presión (filtros prensa) o depresión (filtros prensa) muy usados en la industria se incorporan a la técnica de depuración de aguas residuales. El paso final en la eliminación de los lodos, puede estar en reducirlos a cenizas mediante la incineración. Se reduce al mínimo volumen y se elimina toda posibilidad de contaminación al poder asegurar una casi total inocuidad contaminante.

Parece pues que las eras de secado han quedado anticuadas y que no se debería tratar de ellas más que como una consideración histórica. Pero hay un factor, el económico, que las hace rentables para los núcleos de pequeña población.

Las eras de secado son tratadas en la mayoría de los textos de una forma superficial y sin profundizar en su estudio. Por tanto considerando las necesidades de depuración de los pequeños núcleos, la influencia que tiene en el secado por este método la climatología y la poca o casi nula definición de los parámetros básicos de diseño, esta tesis se propone definir unos parámetros que permitan al proyectista diseñar más eras funcionales y efectivas.



Para definir las eras de secado se ha atendido a los siguientes elementos:

- Definición de la granulometría del filtro.
- Definición de la geometría de la obra civil.
- Definición de la superficie necesaria

La metodología seguida en la obtención de conclusiones originales ha sido doble:

- A) Recopilación de la experiencia del autor en los cinco años de explotación de las Plantas Depuradoras del Excmo. Ayuntamiento de Madrid como ingeniero de la empresa contratista de dicho servicio.
- B) Ensayos y determinaciones realizados en el Laboratorio de la citada empresa y en la de la Escuela de Caminos y en eras en modelo reducido construidas especialmente para este trabajo.

Hay que señalar que el fenómeno de secado por eras es un proceso natural y por tanto hay que contar con un factor, la climatología, que lo hace variable y solo cuantificable de una forma relativa y por aproximación a otros fenómenos parecidos en la industria pero perfectamente controlados.

PRIMERA PARTE

=====

PRESENTACION GENERAL

=====

## 2. SECADO DE LODOS

=====

## 2. SECADO DE LODOS

=====

### 2.1. Introducción

Se denomina "lodos" de aguas residuales a las suspensiones, más o menos concentradas, de las sustancias contaminantes eliminadas de la fase líquida en el proceso de depuración y sustancias añadidas en el tratamiento para mejorarlo (reactivos)

Estas suspensiones una vez separadas del agua hay que darles un destino final. Pueden ser reutilizados como abonos, o simplemente eliminados. La eliminación puede ser mediante descarga a vertedero, - vertido directo al mar, inyección en el suelo o incineración. En los casos de reutilización o descarga en vertedero es necesaria una concentración de la suspensión, es decir producir un SECADO.

### 2.2. Definiciones y Teoría General

#### 2.2.1. Lodos.-

Cuerpos contaminantes eliminados de la fase líquida, a lo largo del tratamiento de depuración de aguas, cualquiera que sea su naturaleza, mas o menos concentrados en suspensiones acuosas.

#### 2.2.2. Constitución de los lodos

- Materias granulosas minerales (arena, limo, escoria, cascarilla) de elevada masa específica.
- Materias floculadas o gelificadas procedentes generalmente de las partículas coloidales (orgánicas o minerales) que engloban un

volumen importante de agua ligada de masa - específica reducida (floculos biológicos de alto contenido en proteínas, floculos de hidróxidos metálicos)

- Grasas y aceites de pequeña masa volúmica y de caracter hidrófobo.

### 2.2.3. Características de los lodos

#### 2.2.3.1. Concentración en materia seca

Se denomina también sequedad de la suspensión fangosa. No tiene en cuenta las sustancias disueltas y se expresa, generalmente, en gramos litro o en porcentaje de la masa total del lodo.

#### 2.2.3.2. Contenido en materias volátiles

Se expresa en porcentaje de la masa de materia seca. En el caso de aguas usadas urbanas o de aguas tratadas biológicamente, este contenido es característico generalmente, del contenido en materias nitrogenadas y constituye un dato valioso sobre las posibilidades de deshidratación mecánica.

#### 2.2.3.3. Aptitud para el espesamiento

Pueden conocerse las posibilidades de concentración natural por sedimentación, estableciendo las curvas de sedimentación correspondientes a periodos de 6 a 48 h. en probetas cilíndricas.

#### 2.2.3.4. Viscosidad

Puede alcanzar hasta 30 centipoises con algunos lodos espesados de decantación primaria-

de aguas residuales urbanas (concentración próxima al 12%)

#### 2.2.3.5. Tixotropía

Esta característica es tan esencial como la anterior para apreciar las posibilidades de recogida, transporte y bombeo de los fangos. Se refiere a la aptitud de un lodo a ser manejado como un sólido, en ausencia de toda agitación y a su transformación en un fluido cuando se agita ligeramente.

#### 2.2.3.6. Filtrabilidad

Se caracteriza por la resistencia específica a la filtración.

#### 2.2.3.7. Compresibilidad

Se define por medio del llamado coeficiente de compresibilidad, indicativo del grado de asentamiento de la materia seca contenida en el lodo sobre sí misma bajo el efecto de un aumento de presión.

#### 2.2.3.8. Centrifugabilidad

Se define por medio del llamado grado de separación de materias secas, bajo la acción de un campo de aceleración elevado.

#### 2.2.3.9. Agua ligada

El agua contenida en el lodo es la suma:

- de un agua libre más o menos eliminable por decantación prolongada,
- de un agua ligada, por capilaridad y por solvatación.

Esta agua ligada necesita, para su liberación, una energía suplementaria.

#### 2.2.4. Procedencia de los lodos

Los fangos pueden proceder de los siguientes - procesos de la depuración de agua:

- a) Los sólidos densos, principalmente minerales se dimentados de aguas turbias de río, con o sin coagulación
- b) Los sólidos floculentos, minerales y orgánicos-sedimentados de aguas superficiales coaguladas o conteni dos en las aguas de lavado de los filtros de agua.
- c) Los sólidos floculentos, principalmente minerales, precipitados por aireación o por productos químicos de aguas que contengan hierro o manganeso en solución.
- d) Los sólidos densos principalmente minerales, ob tenidos como suspensiones espesas después de la precipitación de aguas duras o después de la evaporación de aguas salinas.
- e) Los sólidos densos, principalmente minerales, - obtenidos como arenillas en los desarenadores.
- f) Los sólidos de tamaño considerable, principal - mente orgánicos, obtenidos por las rejillas y tamices de las aguas residuales.
- g) Los sólidos flotantes, principalmente orgánicos obtenidos como espumas o natas de las aguas residuales - en los tanques de flotación, desnatado o de sedimentación.
- h) Los sólidos que se sedimentan, principalmente - orgánicos, obtenidos como lodos de los decantadores de- aguas residuales.

### 2.2.5. Cantidades de lodos

Las estimaciones de las cantidades probables se pueden basar en los análisis de las aguas que se van a tratar en las plantas de depuración. Los lodos extraídos de los tanques de sedimentación y coagulación y de las aguas de lavado de filtros varían enormemente con la naturaleza del agua.

En estaciones de depuración de aguas residuales domesticas, se puede hacer una estimación, a partir del numero de habitantes, teniendo en cuenta el proceso que se utiliza, ya que conociendo la concentración de solidos en las aguas, la retención que se obtendrá en el proceso y la concentración teórica de los fangos obtenidos se puede hallar los litros por habitante y día.

La experiencia obtenida en las plantas de Europa y America, permite establecer la siguiente tabla -  
(Im hoff)



TABLA DE LAS CANTIDADES DE LODO

	a	b	c	d
	Conte nido- de só lidos en g/ hab - dia.	Conte nido- de só lidos en %	Conte nido- de a- gua.  %	Cantidad de lodo- l/hab/dia  $(\frac{a}{b} - \frac{100}{1000})$
Decantadores con digestores				
Lodo fresco extraído bajo el agua en los tanques tolva ..	54	2,5	97,5	2,16
Lodo fresco, desprovisto del agua en exceso al ser bombeado .....	54	2,5	95	1,08
Lodo digerido húmedo .....	34	13	87	0,26
Lodo digerido secado al aire (aireado) .....	34	45	55	(0,13)
Lechos bacterianos con digestores		I = de baja carga II = de alta carga		
Lodo de los decantadores secundarios .....	I 13 II 20	8 5	92 95	0,16 0,40
Lodo fresco mixto (de los decantadores primarios y secundarios) .....	I 67 II 74	5,5 5	94,5 95	1,22 1,48
Lodo mixto digerido húmedo ..	I 43 II 48	10 10	90 90	0,43 0,48
Lodo mixto digerido seco (aireado)	I 43 II 48	45 45	55 55	(0,17) (0,19)
Instalación de activación - con digestores				
Lodo en exceso bombeado fresco .....	I 31 II 25	0,7 1,5	99,3 98,5	4,43 1,67
Lodo en exceso, con la misma densidad que tiene al separarse a la media hora en una muestra de agua del tanque de aireación .....	I 31 II 25	1,5 2,0	98,5 98	2,07 1,25
Lodo en exceso fresco mezclado en los decantadores primarios con el fango de estos decantadores .....	I 85 II 79	4,5 4,5	95,5 95,5	1,87 1,75
Lodo mixto digerido .....	I 55 II 52	7 10	93 90	0,79 0,52
Lodo mixto digerido, secado al aire (aireado) .....	I 55 II 52	45 45	55 55	(0,23) (0,22)

### 2.2.6. Manipulación de los lodos

Los lodos húmedos hay que transportarlos desde los lugares de obtención (decantadores, desnatadores, rejillas y tamices) hasta los aparatos donde se acondicionan para su eliminación (espesadores, digestores, filtros, hornos, bombeos)

El transporte de lodos se realiza generalmente por tubería, ya que es normal tener que sobreelevarlos ya que su obtención, se realiza en las partes profundas de las instalaciones. La conducción puede ser también por gravedad en canal abierto.

Hay que considerar que los lodos son sustancias pseudohomogeneas y que por lo tanto su comportamiento hidráulico es complejo. Muchos de ellos son fluidos no newtonianos con propiedades plásticas en lugar de viscosas. Por tanto su resistencia al flujo será función de su concentración.

Su comportamiento hidráulico es complicado, debido a que la mayoría son tixotrópicos (sus propiedades plásticas cambian durante la agitación y la turbulencia) Los gases desprendidos durante el transporte dificultan el comportamiento hidráulico

En general persiste el flujo laminar o de transición, a velocidades relativamente altas (0,5 a 1,4 m/sg.) para suspensiones espesas que circulen en tuberías de 5 a 12 pulgadas.

A velocidades turbulentas se comportan en forma similar a la del agua.

Una relación que nos da la pérdida de carga - para un regimen laminar de líquidos plásticos en - tuberías (se basa en la fórmula de Poiseulle)

$$h = 10.1. \frac{V}{gd^2} \left( \frac{\eta}{\rho} + \frac{1}{6} \frac{\tau}{\rho} \frac{d}{v} \right) \quad 2.2.1.$$

en donde:

$h$  = en metros

$l$  y  $d$  = longitud y diametro

$v$  = velocidad del lodo

$\eta$  = coeficiente de rigidez

$\tau$  = esfuerzo cortante en el punto de fluencia

$\rho$  = densidad

Los terminos dentro del parentésis, son análogos a la viscosidad cinemática de un liquido newtoniano.

La tixotropía hace difícil la determinación de  $\frac{\eta}{\rho}$  y  $\frac{\tau}{\rho}$  no siendo satisfactorias las pruebas de viscosimetría.

Para lodos espesos digeridos los valores de  $\eta$  y  $\tau$  son 0,03 y 0,1 y para los activados frescos de baja concentración de sólidos (2 %)  $\tau$  no se puede medir y  $\eta/\rho$  es practicamente la viscosidad cinemática del agua.

Los lodos frescos tienen una pérdida de carga que varía entre 1,5 y 4 la del AGUA LIMPIA.

En regimen turbulento, la pérdida de carga sufre un incremento de 1% por cada 1% de aumento en contenido de sólidos.

Las velocidades de transporte de fangos deben ser lo suficientemente altas para que no se produzcan sedimentaciones. Pero hay que considerar que en algunas partes de la estación, no nos interesa la rotura del floculo (ejem. Recirculación a activación) En estos casos se recomienda los elevadores por aire que actúan al producir una variación de presión

En el bombeo de lodos se utilizan para pequeñas velocidades bombas de pistón, de diafragma, helicoidales y eyectores de aire comprimido. Para velocidades mayores de 2 m/sg. se utilizan bombas centrífugas.

Se procurará que en las redes de transporte de lodos exista la posibilidad de conectar agua a presión para desatascarlas, ya que al interrumpir el funcionamiento se secan los lodos y las ostruyen.- En esta misma línea de actuación es recomendable que vayan canalizadas por galerías visitables las tuberías enterradas ya que se facilita la reparación.

### 2.3. Deshidratación de los lodos

El componente principal de los lodos, es el agua. Un lodo tipo, puede contener el 95% de agua. - Por tanto la eliminación de ella es el objetivo primordial, para reducir su peso y volúmen que facilitara su manejo y evacuación. De la importancia del contenido de agua nos da una visión la figura 2.3.1 en la que se representa la marcha decreciente del volúmen del lodo por concentración y secado.

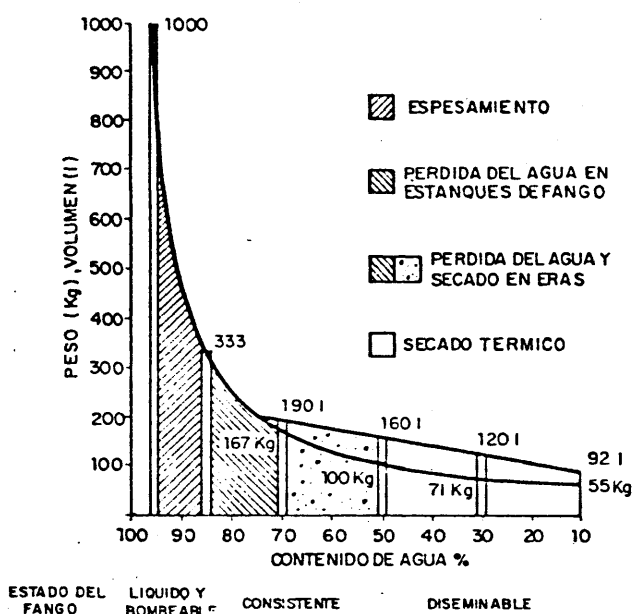


Fig. 2.3.1 Disminución del peso y volúmen del lodo, por pérdida de su contenido de agua.

El agua está, en el fango en las dos condiciones de agua libre y agua ligada. La primera es drenable, o se puede eliminar por decantación prolongada. - El agua ligada la podemos suponer que se encuentra bajo tres condiciones:

- a) Agua retenida capilarmente.
- b) Agua retenida dentro de cada partícula (humedad de la partícula)
- c) Agua perteneciente a las moléculas químicas, que constituyen las partículas.

Esta agua ligada, solo puede eliminarse con un aporte de energía, correspondiéndole una energía de enlace, tres veces superior a la de vaporización del agua pura. Para hacer transportables los lodos, hay que hacer desaparecer también parte de esta agua ligada.

Por tanto la deshidratación de los lodos se realizará, en las formas siguientes:

- a) Filtración o drenaje simple sobre una membrana filtrante.
- b) Filtración o drenaje mecánico, ya sea por medio de vacío o presión.
- c) Evaporación por medio de aportación de energía calorífica.

### 2.3.1 Filtración. Leyes Generales

La ley general que rige el proceso de filtración, es la de Darcy, que dice que la pérdida de carga del fluido es proporcional a la velocidad de filtración.

$$V = K \frac{P}{\eta R} \quad (2.3.1)$$

Siendo:  $V$  = velocidad de filtración

$\eta$  = viscosidad dinámica

$R$  = resistencia del medio

$P$  = pérdida de carga

La filtración podrá ser, superficial o profunda. Es superficial, cuando las partículas son superiores al diametro de los poros de la masa filtrante. Se forma entonces una torta de filtrado. Si los poros son de mayor tamaño que las partículas a filtrar, estas quedaran retenidas en el interior de la masa filtrante, llamandose entonces filtración en profundidad.

### 2.3.2 Filtración superficial

Si consideramos la filtración superficial - la resistencia del medio  $R$ , de la ecuación de Darcy, - será la suma de la de la torta  $R_g$ , más la de la membrana  $R_m$ .

$$R_g = r \cdot \frac{M}{S} = r \frac{C \cdot v}{S} \quad (2.3.2)$$

Donde:  $r$  = resistencia específica de la torta  
 $V$  = volumen de filtrado al cabo de un tiempo  
 $C$  = masa depositada por unidad de volumen -  
 del filtrado.  
 $S$  = superficie de filtración  
 $M$  = masa total de la torta depositada.

Entrando en la ecuación (2.3.1) obtenemos:

$$V = \frac{1}{S} \frac{dv}{dt} = \frac{P}{\eta \cdot \left\{ \frac{Cv}{S} + R_m \right\}} \quad (2.3.3)$$

La integración de esta ecuación, nos conduce a una -  
 del tipo

$$\frac{t}{v} = a + bv \quad (2.3.4)$$

$$\text{con } a = \frac{\eta R_m}{P S} \text{ y } b = \frac{\eta r c}{2 P S^2},$$

Siendo:  $t$  = tiempo, en segundos

$v$  = volumen del filtrado recogido, en  $\text{cm}^3$ .

$\eta$  = viscosidad del filtrado, en poises

$c$  = contenido en M.S. del lodo antes de la filtración, en  $\text{g/cm}^3$ .

$P$  = presión diferencial de filtración, en  $\text{g/cm}^2$ .

$S$  = superficie de filtración, en  $\text{cm}^2$ .

$r$  = resistencia específica, en  $\text{cm/g}$

$R_m$  = resistencia del material filtrante por unidad de superficie, en  $\text{S}^2/\text{cm}^2$ .



La ecuación (2.3.4) se representa en la figura 2.3.2

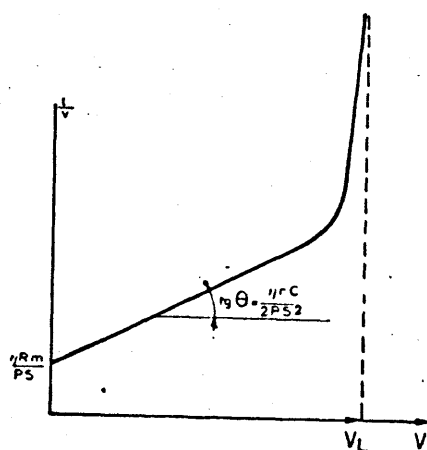


Fig. 2.3.2

Esta integración sólo es correcta en la medida en que puedan considerarse constantes  $P$ ,  $\eta$ ,  $r$ ,  $C$  y  $R_m'$ , lo que no es exacto en el caso de  $P$  y  $\eta$ .

Si se prolonga, durante un tiempo bastante largo la filtración de un volumen determinado de torta, - se llega, en primer lugar, a un punto de ruptura de la curva, más allá del cual la sequedad aumenta muy lentamente hasta alcanzar la sequedad límite de la torta.

$r$  se expresa en  $S^2/g$  o en  $cm/g$  según la dimensión elegida para  $P$  ( $g/cm^2$  o  $dinas/cm^2$ ). La segunda unidad, la más utilizada, es  $10^3$  veces mayor que la primera.

El valor de  $r$  aumenta con la presión, según una ley de la forma

$$r = r_0 + r_{0,5} \left( \frac{P}{0,5} \right)^s \quad (2.3.5)$$

Generalmente asimilable a

$$r = r_{0,5} \left( \frac{P}{0,5} \right)^s \quad (2.3.6)$$

$r_0$  y  $r_{0,5}$  son, respectivamente, los valores de las resistencias específicas a 0 y 0,5 bares.

$r_{0,5}$  se utiliza, generalmente, en la comparación de diversos lodos.

$r$  se denomina coeficiente de filtrabilidad a la presión  $P$ .

$s$  es el factor de compresibilidad del lodo segunda característica fundamental. Cuanto menor es éste, mayor es el efecto de la presión en la velocidad de filtración.

### 2.3.3 Filtración profunda

Los estudios matemáticos parten de las ecuaciones siguientes:

ecuación de Ison

$$\frac{dC}{dl} = FC \quad (2.3.7)$$

(válida en 1ª aproximación)

ecuación de Darcy

$$\frac{dP}{dl} = KV \quad (2.3.8)$$

En las cuales:

- C - es la concentración de un agua en materias en suspensión.
- V - es la velocidad de filtración calculada sobre una superficie perpendicular al flujo.
- I - es la distancia de una sección cualquiera del filtro a la sección de entrada.
- K - es el coeficiente de Darcy
- F - es el coeficiente de filtración
- P - es la pérdida de carga

## a) Balance de materias

Sea un elemento de lecho filtrante de longitud  $dl$  y de sección  $S$ , siendo  $C$  la concentración a la entrada y  $C + dC/dl$  la concentración a la salida. Sea  $q$  la masa de materias retenidas por unidad de volumen del lecho. El balance de materias se expresa por la ecuación siguiente:

(2.3.9)

$$SV \, dtC = SV \, dt \left\{ C + \frac{dC}{dl} dl \right\} + S \, dl \, dq$$

que, finalmente, equivale a:

$$\frac{dC}{dl} = \frac{1}{V} \frac{dq}{dt} \quad (2.3.10)$$

Utilizando las ecuaciones (2.3.7) y (2.3.10) - pueden determinarse el atascamiento del filtro y la concentración de materias en suspensión del agua filtrada. La ecuación (2.3.8) da el valor de la pérdida de carga.

Se plantea una dificultad por el hecho de - que los coeficientes  $F$  y  $K$  son función del atascamiento y deben establecerse hipótesis en relación con sus variaciones.

## b) Atascamiento de un filtro

El coeficiente de filtración  $F$  varía entre - un valor inicial  $F_0$  y 0. Entre estos dos puntos, se supone una variación lineal  $F = F_0 \left\{ 1 - \frac{q}{q_1} \right\}$  (2.3.11)

q) el atascamiento de la materia filtrante (masa de sedimento por volumen unitario del lecho)

q 1) valor máximo de q

Integrando las fórmulas (2.3.7) y (2.3.10) se obtiene:

$$\frac{q}{q_1} = \frac{1 - e^{-At}}{1 + e^{-At} (e^{F_0 l} - 1)} \quad (2.3.12)$$

con:  $A = \frac{F_0 V C_0}{q_1}$

c) Calidad del agua filtrada

Si L es la altura de la capa filtrante, se tiene:

$$C_L = \frac{C_0}{1 + e^{-At} (e^{F_0 l} - 1)} \quad (2.3.13)$$

Si se desea que el agua filtrada tenga una concentración igual o inferior a un valor determinado  $C_{L1}$ , puede calcularse el valor de t a partir de la ecuación anterior, siendo conocidos los restantes factores.

d) Pérdida de carga

La variación de k, coeficiente de Darcy, es, por hipótesis, de la forma:

$$\frac{K}{K_0} = \frac{1 + (a - 1) \frac{q}{q_1}}{1 - \frac{q}{q_1}} \quad (2.3.14)$$

Integrando la ecuación de Darcy, se obtiene:

$$P = K_o V \left\{ 1 + \frac{a (e^{At} - 1)}{F_o} (1 - e^{-F_o t}) \right\} \quad (2.2.15)$$

que se descompone en dos términos:

- uno,  $K_o V$  corresponde a un flujo clásico en medio poroso no atascado;
- el otro corresponde al atascamiento de la capa filtrante.

Utilizando la ecuación (2.3.15) pueden estudiarse las curvas de atascamiento y de pérdida de carga. Igualmente, puede calcularse el tiempo  $t$  necesario para alcanzar el valor máximo  $P$  de pérdida de carga  $P_{max}$ .

#### 2.3.4 Filtración de lodos

La filtración de lodos ya sea natural o mecánica, responderá a la aplicación de la ley de Darcy - que se ha obtenido en la forma  $\frac{t}{v} = a + bv$  (2.3.4) según se ha definido anteriormente.

##### 2.3.4.1 Resistencia específica del lodo

La resistencia específica del lodo (o coeficiente de filtrabilidad a una presión diferencial de 0,5 bar) es una magnitud esencial, eminentemente representativa del lodo. El proceso de acondicionamiento tendrá por objeto reducir esta resistencia específica, de forma que se acelere la filtración.

La resistencia específica,  $r$ , se expresa en cm/g en el sistema C.G.S.

Influye en ella el porcentaje de materias coloidales que contiene el fango; en el caso de aguas residuales urbanas, esta proporción de materias coloidales - sigue sensiblemente la de las materias volátiles, y - en la figura 2.3.3 se han representado "zonas" relativamente características de lodos frescos y lodos digeridos.

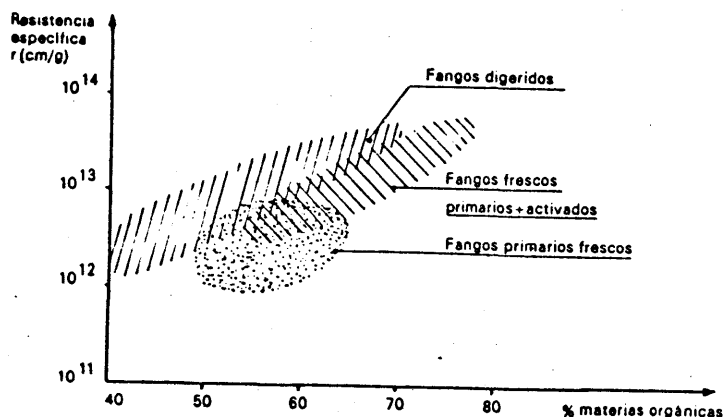


Fig. 2.3.3 Resistencia específica de lodos (fangos) urbanos

Teóricamente, la resistencia específica de un lodo es independiente de la mayor parte de las condiciones de secado; es una característica propia de la materia, independientemente de su concentración.

Sin embargo, en la práctica, el valor característico inmediatamente utilizable es el coeficiente de filtrabilidad  $R$ , para una presión diferencial dada; en la mayoría de los casos,  $R$  es función de  $P$ .

#### 2.3.4.2 Compresibilidad del lodo

Al aumentar la presión diferencial, se produce, un cierre de los poros de la torta, que da lugar a una resistencia mayor a la filtración. El coeficiente de compresibilidad del lodo interviene en la definición del coeficiente de filtrabilidad, según la relación;

$$R = 2^s r_{0,5} P^s.$$

En el caso de lodos minerales y granulosos, la materia es prácticamente incomprensible y  $s = 0$ . Esto sucede con precipitados cristalinos (sulfato cálcico - carbonato cálcico - fangos de descarbonatación, sin ayudante de floculación - tierra de infusorios, etc.) - Puede trabajarse entonces a presiones diferenciales muy fuertes. Los lodos procedentes de las aguas residuales urbanas tienen coeficientes de compresibilidad que varían entre 0,7 - 0,8 para lodos frescos primarios, y 0,95 para lodos activados puros con muchas materias proteínicas.

Con muchos lodos orgánicos, existe una "presión crítica" por encima de la cual el cierre de los poros de la torta es tal que se hace imposible todo drenaje. - Con lodos residuales urbanos, por ejemplo, no interesa prácticamente una presión de filtración superior a 15 bares.

#### 2.3.4.3 Sequedad límite del lodo

Si se filtra un lodo a una presión diferencial elevada (de 5 a 15 bar), la curva de filtración  $t/v = f(v)$  presenta la forma característica de la figura 2.2.2.

Se observan tres partes en la curva:

- una parte rectilínea en la que se respeta la ley general de la filtración, como en el caso de una presión diferencial menor (de 0,5 a 1 bar por ejemplo) La pendiente de la recta corresponde a la definida anteriormente;



- una parte asistótica en la que, al aumentar el tiempo de filtración, no aumenta el volumen de filtrado. Una serie de fenómenos complejos, como son la compresión diferencial de la torta, el aumento de la viscosidad del filtrado, el atascamiento del medio filtrante y la deformación de los aglomerados de la materia por efecto de la presión, producen este "bloqueo"
- una zona de enlace

Se define precisamente como "sequedad límite"  $S_L$ , la sequedad de la torta obtenida después de un tiempo infinito de filtración.

Mediante las curvas  $S_L = f(P)$  puede determinarse aproximadamente, en el caso de filtraciones a gran presión a la cual debe operarse para obtener la sequedad deseada. La presión elegida deberá ser tal que el punto de funcionamiento se encuentre antes del punto de enlace existente, si quieren mantenerse unas condiciones de explotación aceptables (cadencia de filtración suficientemente rápida)

La sequedad límite será igualmente tanto más elevada cuanto menor sea el contenido de materias coloidales del lodo.

### 2.3.5 Transmisión de calor. Leyes Generales

El secado térmico es el procedimiento idóneo, para eliminar la humedad de los lodos. Hay que considerar que si no se utiliza de una forma general, es p por el coste económico. Solo interesa en los casos en que se pueda utilizar el lodo desesecado, como recuperable para un proceso industrial, o que el volúmen sea - factor predonimante en el proceso de eliminación. Los - lodos de una gran aglomeración urbana sin posibilidad - de vertido directo al mar, ni con vertederos a corta - distancia, pueden hacer aconsejable la incineración de - los lodos. El estudio de la transmisión de calor, que - a continuación se describe, es la teoría general de la - ingeniería de procesos industriales básicos. Aunque para esta rama de la técnica, es elemental, se pretende que - sirva de base para la explicación del secado natural de lodos.

#### 2.3.5.1 Energía calorífica

La idea de calor está supeditada a la idea de su transmisión desde un cuerpo a otro de menor temperatura, pudiéndose, por lo tanto, definir el calor como aquella forma de energía que se transmite gracias a una diferencia de temperaturas. Si dos cuerpos se hallan en contacto, el calor se transmite del uno al otro directamente por conducción. Cuando no están en contacto tam-bién hay transmisión de calor, bien sea por convección - o por radiación.

Estos tres mecanismo, por los que se transmite el calor, pueden definirse de la siguiente manera:

Conducción es la transmisión de calor de - una parte a otra del mismo cuerpo o de dos cuerpos que se encuentran en contacto físico, sin que tenga lugar -

Convección es la transmisión entre un punto y otro de un fluido, entre un fluido y un sólido, o entre dos fluidos, gracias al movimiento o mezcla de los fluidos considerados. Si el movimiento se debe únicamente a las diferencias de densidades producidas por las diferencias de temperaturas, el mecanismo recibe el nombre de convección natural, y si el movimiento se favorece por procedimientos mecánicos, se denomina convección forzada.

Radiación es la transmisión de calor que tiene lugar por absorción de energía radiante. Los cuerpos emiten ondas electromagnéticas en todas direcciones, y a todas las temperaturas. La propiedad más importante de dichas ondas es la de transmitir energía. Cuando éstas inciden sobre un cuerpo, una parte resulta reflejada, otra es transmitida, y el resto se absorbe. Aunque las ondas absorbidas pueden transformarse en otras formas de la energía, como sucede en las transformaciones fotoquímicas, por lo general se transforman en calor. La luz es energía radiante de este tipo, pero de menor longitud de onda o mayor frecuencia. Las ondas electromagnéticas que emite el Sol atraviesan el espacio en línea recta, proporcionando a la Tierra luz y calor.

En realidad, la transmisión de calor se verifica, simultáneamente, por más de uno de los mecanismos citados. En cualquiera de los casos, la velocidad de transmisión se expresa como cociente entre un potencial-térmico (diferencia de temperaturas) y una resistencia.

$$\begin{aligned} \frac{dQ}{dt} &= \frac{\text{Dif. de potencial}}{\text{Resistencia}} = \frac{T_1 - T_2}{1/UA} = \\ &= UA (T_1 - T_2) \end{aligned} \quad (2.3.16)$$

En donde

$\frac{dQ}{dt}$  = velocidad de transmisión calorífica (en Kcal/hora) en la dirección del punto 1 al 2.

$t$  = tiempo (en horas)

$T_1$  = temperatura en el punto 1 (en °C)

$T_2$  = temperatura en el punto 2 (en °C)

$U$  = coeficiente global medio de transmisión calorífica (en Kcal/hora) (°C) ( $m^2$ ).

$A$  = superficie de transmisión en ( $m^2$ ).

El producto del coeficiente global,  $U$ , por la superficie,  $A$ , es el inverso de la resistencia ( $1/UA$ ).  $U$  es una conductividad, o sea, el inverso de una resistividad, y constituye un método fácil para comparar y relacionar las velocidades de transmisión de calor.

#### 2.3.5.2 Desecación de solidos

Consideremos el secado de un material - poroso e insoluble, colocado en una bandeja aislada; el medio secante es aire caliente que circula sobre su superficie y que proporciona directamente por transmisión el calor necesario para la evaporación del agua y la calefacción del sólido. Si la velocidad del aire es tal - que, virtualmente resulten inafectadas su temperatura, - su humedad y su velocidad, se obtienen unos resultados - como los representados en la figura 2.3.5 que dan el -

de agua evaporada por hora y por kilogramo de sólido seco)

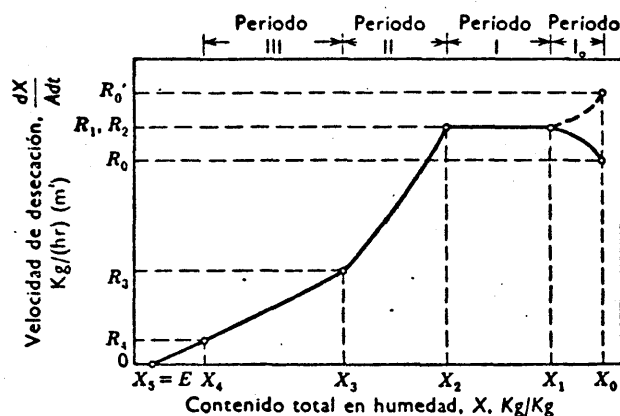


Fig. 2.3.5 Velocidad de desecación en función de la humedad total.

Se construye así la curva característica de la velocidad de desecación, curva que refleja el paso por distintos períodos a medida que la humedad del sólido se reduce desde un elevado valor inicial hasta el pequeño - valor final, y que son los siguientes:

PERIODO  $I_0$  - Período inicial, durante el cual la velocidad de secado aumenta o disminuye rápidamente, desde un valor inicial. Su duración es relativamente corta y en algunos experimentos no llega a observarse.

PERIODO I. - Primera etapa de secado, en la que la velocidad de desecación es constante.

nuye en mayor o menor proporción a medida que lo hace el contenido en agua.

PERIODO III. - Este estado es inmediato al Periodo II, aunque no siempre se diferencia claramente de él; mientras dura, la velocidad de desecación disminuye proporcionalmente con la humedad y es distinta de la que corresponde al Periodo II.

Prolongando el secado en estas condiciones, llega un momento en que la velocidad se hace cero. El contenido mínimo de agua que puede alcanzarse con una desecación de duración infinita se denomina humedad de equilibrio.

La humedad de equilibrio  $X^*$ , es el límite al que puede llevarse la desecación de una sustancia con un medio secante de determinadas temperatura, humedad etc., y depende de la naturaleza del sólido, de la temperatura del agente secante y de su humedad relativa. Aun tratándose de un sólido, es difícil encontrar una ecuación general que ligue todas estas variables, que, por otra parte, debe ser de tipo experimental. - Cualquiera que sea la humedad del medio secante, la humedad de equilibrio de una sustancia depende de ella misma. Las sustancias no prorosas y muy insolubles tienen humedades de equilibrio prácticamente nulas, mientras que muchos productos orgánicos, como el jabón, el cuero y la madera, poseen humedades de equilibrio que varían mucho con la temperatura y la humedad del medio secante. De tres formas distintas puede estar ligada al producto el agua que constituye su humedad de equilibrio, a saber, absorbida por él, retenida en sus poros por fuerzas capilares, o combinada químicamente.

La humedad libre,  $F$ , es la diferencia entre la humedad total,  $X$  y la de equilibrio,  $X^*$ , expresadas en kilogramos de agua por kilogramo de sólido seco.

$$F = X - X^* \quad (2.3.17)$$

Si la humedad total es  $X$ , la humedad libre,  $F$ , será función de las mismas variables que la de equilibrio,  $X^*$ . El valor de la humedad libre carece de significado si, con el no se conocen también la temperatura y la presión parcial del vapor de agua del medio secante y la humedad de equilibrio del sólido. De ordinario, la humedad de equilibrio es pequeña respecto a la humedad total, por lo que la humedad libre varía muy poco al variar la temperatura y la humedad del medio secante.

Las velocidades de secado se suelen representar en función de la humedad libre y no de la humedad total, porque para cualquier materia, siendo constantes la temperatura y la humedad del medio secante, la velocidad de desecación es cero cuando la humedad libre es también cero.

El Periodo  $I_0$  es esencialmente inestable y durante el mismo las condiciones del secado se ajustan a las del régimen estacionario representado por el Periodo  $I$ .

Si el sólido inicialmente está frío, es decir, por debajo de la temperatura de saturación adiabática del agente secante, el mecanismo de la desecación se explica porque, debido a la transmisión de calor que tiene lugar desde los gases calientes a la superficie húmeda y fría del sólido, la temperatura del agua se eleva y se evapora después tomando también su calor latente del gas caliente. El calor se aprovecha también para aumentar la temperatura de la superficie y la temperatura media del sólido. El agua se evapora porque la presión de vapor de agua que moja el sólido es mayor que la presión parcial del vapor de agua en el medio secante. Al aumentar la temperatura de la superficie aumenta la cantidad de agua evaporada y disminuye la velocidad de transmisión calorífica hacia el sólido; después de poco tiempo, el calor transmitido es igual al necesario para la evaporación del agua, y cuando se alcanza la temperatura húmeda, la cantidad de agua evaporada es constante.

Cuando la temperatura inicial del sólido es más alta que la temperatura húmeda del medio secante el mecanismo de regulación es el mismo; pero con la excepción de que el calor latente necesario es mayor que el transmitido al sólido, por lo que la velocidad de desecación disminuye hasta llegar a la del régimen estacionario.

Cuando la temperatura inicial del sólido sea la de saturación adiabática del medio secante no aparecerá el período inicial, por lo que el secado comenzará ya con una velocidad constante.



Periodo I, o período en que la velocidad de secado es constante. Comienza cuando la humedad libre es  $F_1$  y termina cuando la humedad crítica es  $F_2$ , como indica la figura (2.3.5) Cuando la desecación se lleva a cabo en una bandeja aislada, este periodo se caracteriza por que la velocidad de secado es uniforme y por que la temperatura en la superficie y en el interior del sólido, es constante; Es éste el periodo de régimen estacionario que se alcanza al final del Periodo I, y se mantiene mientras llegue a la superficie del producto (por capilaridad) la misma cantidad de agua que se evapora. Cuando no es así, la velocidad disminuye y termina el Periodo I de velocidad constante. Por tanto, su duración depende fuundamentalmente del mecanismo por el que el agua se desplaza dentro del mismo sólido.

En los sólidos porosos e insolubles, este mecanismo puede ser producido por la acción capilar. Se supone que el menisco superficial de radio pequeño ejerce una fuerza de capilaridad suficiente para extraer el agua a través de los pequeños e intrincados canales interiores que terminan en las interfases gas-agua de radios mayores.

El agua eliminada de la superficie del sólido húmedo necesariamente debe ser reemplazada por aire que penetre en el sólido a través de los canales más anchos que están en conexión con los poros de la superficie. Debido a la complicada red de canalillos que existe bajo la superficie del sólido,-

es posible que el aire entre tan sólo por unos cuantos poros; de esta forma la humedad cerca de la superficie permanece lo suficientemente elevada. El agua continuará ascendiendo a la superficie a través de cualquier sistema de canalillos entrelazados, hasta que todos los meniscos en el extremo inferior de la columna de agua tengan el mismo radio de curvatura que el pequeño menisco de la superficie desde el cual tiene lugar la evaporación. Una vez que se alcanza este estado, la evaporación de una pequeña cantidad de agua superficial hace que el nuevo menisco sea de menor sección y, entonces, la mayor fuerza de capilaridad producida es suficiente para transportar nueva cantidad de agua a la superficie. Esto ocurre efectivamente, pero los meniscos de los extremos inferiores de la columna de agua pueden pasar a través de estrechos conductos hacia cavidades mayores, con lo que disminuiría la tensión superficial para mover el agua hacia la superficie. Sin embargo, los meniscos de los canalillos superficiales volverían entonces a su posición primitiva, lo que permitiría que el proceso continuara.

Transcurrido cierto tiempo, ha de llegar un momento en que los radios de los meniscos de los extremos inferiores de la columna de agua de cualquier sistema de canalillos sean aproximadamente iguales a los de los poros superficiales más pequeños; a partir de este momento cesará el desplazamiento del agua hacia la superficie a lo largo de estos pequeños conductos.

Según este mecanismo de transporte de agua la humedad crítica es función no sólo de la sustancia que se seca, sino también de su espesor y de la velocidad de secado.

Durante el período de velocidad constante la superficie mojada del sólido se comporta como una superficie de agua libre; el agua de la superficie ejerce una presión igual a la presión del vapor de agua,  $P^*$ , a la temperatura de la superficie. Así, - para un medio secante con una temperatura  $T_g$  una presión parcial de vapor de agua  $p$  y una velocidad determinada, la velocidad de desecación puede expresarse por

$$- \frac{dx}{A dt} = K_g M_v (P^* - P) \quad (2.3.18)$$

Análogamente, la velocidad de transmisión del calor puede escribirse así;

$$\frac{q}{A} = (h_c + h_r) (T_g - T_1) \quad (2.3.19)$$

donde,  $h_c$  y  $h_r$  = coeficientes de transmisión del calor por convección y radiación respectivamente.

$T_i$  = temperatura de la superficie del sólido.

Puesto que la temperatura de la superficie es fija durante el período de velocidad constante admitiendo que el aumento de entalpia del agua evaporada es igual al calor latente, se tendrá;

$$K_g M_v (P - P) = \left[ \frac{h_c + h_r}{\lambda T_i} \right] (T_g - T_i) \quad (2.3.20)$$

$$p = p - \frac{h_c + h_r}{K_g M_v \lambda T_i} (T_g - T_i) \quad (2.3.21)$$

El Período II es el primero de velocidad decreciente y comienza con la humedad libre  $F_2$  y termina en la  $F_3$  (fig. 2.3.5). Se caracteriza por una disminución de la cantidad de agua evaporada por unidad de tiempo.

po, porque la superficie de evaporación se desplaza - hacia las capas interiores del sólido húmedo con la - consiguiente reducción del radio de curvatura de los - meniscos. Como el calor suministrado no varía, la tempe - ratura en la nueva zona de evaporación aumenta hasta - llegar a la de equilibrio, cuyo valor depende princi - palmente de los radios de curvatura de los meniscos - situados un poco por debajo de la superficie. A medi - da que la desecación progresa, la "superficie mojada" disminuye hasta hacerse igual a cero. Durante todo - este tiempo la evaporación es subsuperficial, y así - termina el Periodo II.

La segunda humedad crítica  $F_3$  'lo mismo que la primera  $F_2$ , no sólo es una "propiedad" del producto - húmedo, sino que depende también de la velocidad de - secado y del espesor del producto.

El Período III es el segundo de velocidad de - creciente; se inicia en  $F_3$ , cuando ha cesado el flujo - capilar hacia la superficie, y continúa por mucho tiem - po hasta que  $F = 0$ , en que la humedad del producto es - la de equilibrio,  $X^*$ . Este período se caracteriza por - existir evaporación subsuperficial exclusivamente, y - como el agua que debe evaporarse cada vez está más le - jos de la superficie, el calor necesario para su eva - poración debe penetrar hasta el interior del producto - parcialmente seco; cuya temperatura superficial se - aproxima, pero no es igual, a la temperatura del gas - secante,  $T_g$ . La temperatura de la superficie de eva - poración tiende a un valor de equilibrio, y está deter - minada, en principio, por el radio del menisco.

La desecación, en conjunto, puede estar formada por todos los periodos descritos o sólo por uno o más - de ellos, según las humedades inicial y final. Para todos los períodos, las velocidades de transferencia de - calor y de materia y los balances de calor y de materia pueden expresarse matemáticamente. Sin embargo las - ecuaciones resultantes son de poca utilidad práctica - porque no se dispone de muchas de las propiedades im - portantes, ni de los coeficientes de velocidad. Además - la solución de tales ecuaciones sería demasiado compli - cada y engorrosa para que resulten de valor práctico.

La curva de desecación correspondiente a un - aire de ciertas características vale para determinar la velocidad de secado en el período en que ésta es cons - tante, aunque sean otras las condiciones del aire emplea - do. Basta tener en cuenta que la velocidad de desecación es proporcional a la potencia 0,8 de la velocidad del - aire y a la presión parcial determinante del transporte de materia. El dato a conocer más importante es la hume - dad crítica primera (la que determina el final del Perio - do I).

### 2.3.6. Centrifugación

La centrifugación es una técnica, que produce la separación de una mezcla sólido-líquido, basandose en la aplicación de una energía cinética a partículas de distinta densidad que produce una separación, por-agrupamiento de materias homogéneas.

Esta técnica se empleó por primera vez, en - Alemania en el año 1.902. Despues se fué mejorando, - introduciendo ya la máquina de proceso continuo y el-acondicionamiento de los lodos por procesos de flocu-lación con polieléctrolitos.

La aceleración a que se someten las particu - las, suele ser superior a la de la gravedad, en una - magnitud que oscila de 1.000 a 3.000 veces. Para el - cálculo de estos procesos, se aplica las fórmulas de-mecánica clásica, siendo interesante definir la efica - cia de la máquina y la centrifugabilidad del lodo.

Se llama "centrifugabilidad" de un lodo, a la aptitud que tiene la suspensión de poderse separar, - por aplicación de energía cinética en dos fases bien-definidas:

- a) Líquido claro con un contenido de 100 - mg/litro de materia sólida.
- b) Torta sensiblemente homogénea de lodos.

Se ensaya en laboratorio y a una velocidad da - da y un tiempo dado se define las condiciones del li - quido y torta.

### 2.3.7. Otros sistemas

Para la deshidratación de los lodos se pueden emplear otros sistemas distintos a los descritos anteriormente, pero fundamentalmente el problema se centra en eliminar, un tanto por ciento de agua muy elevado y se recurre siempre a la filtración y evaporación. Se han diseñado procesos complejos, para lodos especiales como pueden ser los que contienen una elevada proporción de materias grasas. Se acondicionan los lodos con sulfúrico y se actúa después por evaporación fraccionada, o se les somete a chorros de vapor sobrecalentado.

También, se puede aplicar la técnica de "Liofilización". Dicho proceso es un secado discontinuo, consistente en sublimar directamente en vacío el hielo contenido en un lodo congelado previamente.



## 2.4. Metodos de secado de lodos.

### 2.4.1 Naturales

El medio natural de secado de lodos es el filtrado sobre un medio poroso y la evaporación del agua restante, hasta obtener un grado de humedad aceptable para el facil manejo de los mismos.

Esta operación, se puede realizar en Eras de-secado o Estanques de lodos.

#### 2.4.1. Eras de secado

El primer método es el objetivo de esta tésis y por tanto dejamos su descripción y estudio para la -segunda parte, donde se hará una revisión bibliográ -fica y una aportación de conclusiones originales, ba-sadas en ensayos y estudio de las eras en funcionamien-to.

#### 2.4.2.2. Estanques de lodos

Los Estanque de lodos, son balsas de tierra -donde se seca el lodo digerido.

Su construcción es elemental, dado que se pue-den hacer completamente de tierra. Pero hay que con -tar con grandes extensiones de terreno, dado que la -

superficie necesaria es de cuatro veces la de la correspondiente a eras de secado. Hay que tener en cuenta que el terreno escogido, debe ser poroso, para que actúe como filtro.

Los inconvenientes de este método es que:

- 1º) Se contamina el acuífero. Mientras en la era el drenado se devuelve al proceso de tratamiento en este método no.  
Hay que tener en cuenta, que el filtrado puede tener una contaminación en sólidos, de más de 100 p.p.m.
- 2º) La dificultad de retirada o limpieza. Al no ser una superficie completamente lisa, se hace difícil esta operación. Esta dificultad, se puede paliar si se dispone gran cantidad de terreno, y no ser necesaria su utilización, más que cada dos o tres años, dando tiempo a que se degrade totalmente la materia.
- 3º) Gran extensión de terreno con un aspecto estético muy desagradable, pues no hay que perder de vista, que lo que se vierte es agua residual concentrada.

La ventaja principal es su fácil mantenimiento y los pocos gastos de explotación.

#### 2.4.2 Filtración mecánica

La aplicación técnica de la teoría de filtración expuesta en el apartado 2.3 se concreta en la práctica en forzar el paso del agua, a través del medio poroso y obtener así, un rendimiento elevado.

La filtración mecánica puede ser:

- a presión - filtros prensa
- a vacío - filtros de vacío

##### 2.4.2.1 Filtros de vacío

El tipo más usado para lodos de aguas residuales, es el de tambor abierto. Existen otras técnicas como pueden ser bandas porosas sobre las que se ejerce el vacío, pero el de tambor tiene la ventaja que es un proceso continuo.

El filtro giratorio de tambor está constituido, esencialmente, por un cilindro rotatorio, sumergido parcialmente en un depósito que contiene el lodo que debe filtrarse. El tambor está formado por yuxtaposición de cierto número de compartimientos estancos entre sí y recubiertos por una tela que sirve de soporte de filtración. Cada sector está unido al distribuidor por una tubería.

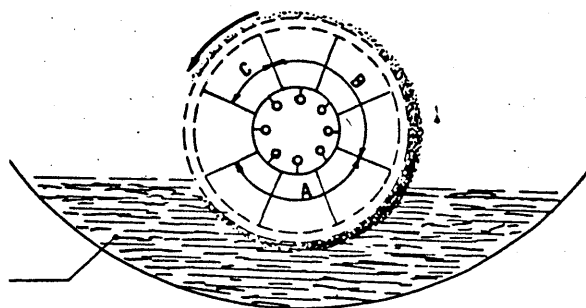


Fig. 2.4.1 Esquema de un filtro de vacío de tambor

La filtración se realiza mediante un giro completo del tambor y podemos distinguir las siguientes zonas:

En la zona A, los sectores están unidos, a través del distribuidor, con el elemento de producción de vacío. El líquido aspirado es evacuado al exterior a través de un recipiente de vaciado. La materia retenida sobre la tela se acumula formando la torta que se va espesando.

La zona B es la zona de escurrido en la que continúa el drenaje de la torta sin aportación de materia, estando en comunicación los sectores con la bomba de vacío (eventualmente, a una presión diferencial superior a la que reina en los sectores anteriores).

La zona C es la zona de descarga. Esta descarga puede realizarse:

- por insuflación de aire comprimido y rascador;
- por insuflación de aire y puesta a la atmósfera;
- por un sistema de hilos o de cadenas;
- por un rodillo prensor con el que se completa, -  
además, el escurrido por aplicación de una sobre  
presión complementaria;
- por sistema de tela saliente.

Con esta solución, se separa totalmente la tela-filtrante del tambor, El cambio de curvatura asegura el desprendimiento de la torta, que se completa con un raspado de seguridad. El lavado de la tela se realiza por medio de agua a presión (3 a 4 bar) inyectada sobre las dos caras. El rodillo que efectúa el cambio de curvatura de la tela puede estar animado, eventualmente, de un ligero golpeteo.

La filtración continua de los lodos se realiza, - industrialmente, con vacíos de 300 a 600 mm. de mercurio. El espesor de la torta varía entre 5 y 20 mm. - Los filtros de tela saliente pueden funcionar con tortas más finas, es decir, con lodos de resistencia específica más elevada, gracias al lavado continuo de - la tela, que limita considerablemente el peligro de - atascamiento.

El tiempo de formación de la torta en un filtro industrial es de unos minutos. La velocidad de rotación del tambor es del orden de 8 a 15 revoluciones por hora.

Las telas filtrantes utilizadas actualmente - están constituidas por fibras, sintéticas. Su tejido debe ser lo más regular posible, y el paso de malla superior a  $150\ \mu$ . Se ha utilizado, en lugar de telas filtrantes, una doble capa de resortes metálicos con lavado exterior independiente. Esta solución, - perfecta desde el punto de vista de un atascamiento - presenta el gran inconveniente de producir filtrados muy cargados, debido al gran paso de malla, mientras que los filtrados obtenidos con telas filtrantes son claros y no ocasionan ninguna sobrecarga de la instalación cuando se recirculan. Los filtros de resorte - por otra parte, son de explotación difícil, en el caso de lodos poco fibrosos, decreciendo notablemente su eficacia y perdiendo también su utilidad si los lodos contienen elementos gruesos, pues en el lavado se separan los resortes introduciéndose entre ellos sólidos gruesos (que hacen que pierda homogeneidad - la superficie de filtrado produciéndose huecos por - donde se pierde todo el filtrado.

Con filtros de tela saliente, pueden considerarse, en primera aproximación, los rendimientos de producción siguientes, si se trata de lodos residuales urbanos después de un acondicionamiento químico adecuado:

- lodos primarios frescos	30 kg.
- lodos primarios digeridos	35 "
- lodos primarios + activados frescos	20 "
- lodos primarios + activados digeridos	25 "
- lodos activados solos, frescos	10 "
- lodos primarios + activados estabilizados	20 "

Estos rendimientos son del orden de 1.000 veces superiores a las eras de secado.

La humedad de la torta procedente de lodos residuales urbanos acondicionados químicamente varía entre el 72 y 21 80 %, según la resistencia específica. Este grado de humedad es menor en el caso de fangos minerales cristalizados.

Los lodos deben acondicionarse, químicamente. Generalmente se usa cloruro férrico y cal. La dosificación varía según la naturaleza del lodo debiéndose realizar experiencias en el laboratorio, para predimensionarlo y corregir sucesivamente cuando vayan apareciendo filtrados con una humedad muy alta.

La operación del filtrado es automática o semi-automática. El operario se limitará a controlar la concentración del lodo entrante para variar la adición de reactivos.

Los filtros de vacíos se construyen con superficies de alrededor de 50 m<sup>2</sup>. por unidad. Hay unos pequeños pero al ser una instalación costosa y compleja solo se instala para grandes volúmenes de lodos y para poblaciones de unos 50.000 habitantes en adelante.

Las bombas de vacío utilizadas son del tipo de anillo líquido. En el caso de aguas de aportación muy duras, y en instalaciones importantes, puede preverse un desendurecimiento o una descarbonatación del agua.

La duración de las telas puede alcanzar 3000 h. de marcha. Las roturas pequeñas pueden repararse fácilmente. Después de cierto tiempo de marcha, la cal de acondicionamiento atasca la tela por carbonatación. Es aconsejable efectuar operaciones periódicas de desatascado; se realizan fácilmente llenando la cuba de filtro con una solución de ácido clorhídrico pasivado y cepillando la tela.

Durante las paradas, debe lavarse el filtro.



Los filtros de vacío son de funcionamiento seguro y de construcción sólida, pero su buena conservación va unida, normalmente, al cuidado general de la instalación.

Pueden construirse de materiales muy variados. Generalmente son de acero pero, en el caso de fangos muy corrosivos o que plantean problemas especiales, pueden construirse de acero inoxidable, acero ebónizado, titanio, plomo, madera, resina, etc.

#### 2.4.2.2. Filtración a presión

Los filtros prensa utilizados normalmente para el secado de lodos, son del tipo de placas. Un filtro está constituido, esencialmente, por una batería de placas verticales yuxtapuestas y apoyadas fuertemente, unas contra otras, por tornillos hidráulicos dispuestos en uno de los extremos de la batería.

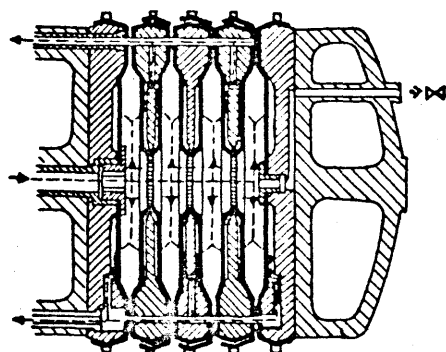


Fig. 2.4.2 Esquema de filtro prensa.

Sobre las dos caras acanaladas de estas placas (de fundición o de materia moldeada) se aplican telas filtrantes. Los fangos a filtrar llegan, a presión, a las cámaras creadas entre dos placas contiguas. El filtrado recuperado por los canales, en la parte posterior de las telas, es evacuado por medio de conductos dispuestos a través de las placas.

Las placas constan, además de orificios cuya alineación constituye los conductos de alimentación de fangos. Estos orificios van dispuestos en el centro o en la periferia de las placas. Con la alimentación central parece conseguirse una mejor repartición, por toda la placa, del caudal, de la presión y por tanto, del drenaje.

Los conductos de evacuación del filtrado pueden estar en comunicación, de una placa a otra, o ser independientes para cada placa. Con esta última solución puede efectuarse un control visual de la calidad del filtrado y, con ello, de la rotura eventual de una tela.

Los filtros prensa, de placas, pueden alcanzar superficies de 400 m<sup>2</sup>. con superficies unitarias de placas de casi 2 m<sup>2</sup>. El número de placas llega, en ese caso, al centenar.

Las telas filtrantes son, generalmente, tejidos de fibras sintéticas. La elección cuidadosa de la calidad de la tela tiene una gran influencia en el rendimiento de una instalación de filtración a presión. En algunos casos, la tela filtrante no va montada directamente sobre la placa, sino sobre una tela soporte, más gruesa, con aspecto de fieltro, con lo que se consigue un reparto mejor por toda la superficie filtrante. La estanquidad del conjunto del filtro-prensa queda asegurada por la presión, muy fuerte, de aplicación de unas placas contra otras. La presión de filtración puede llegar a 25 bar, pero, para el secado de los fangos, muy rara vez interesa sobrepasar una presión de 15 bar.

El espacio que existe entre dos placas, en su parte central hueca, corresponde al espesor de la torta. El espesor puede oscilar entre 30 y 15 mm. según la resistencia específica, más o menos elevada, del fango, y la duración fijada para el ciclo.

En algunos filtros prensa, se disponen unas membranas entre las telas, que pueden ponerse a presión, con aire comprimido, al final del período normal de filtración, de forma que se aplique una sobre presión uniforme complementaria sobre la torta y se mejore la extracción del agua intersticial. Este tipo de filtro se utiliza con frecuencia en el caso de extracción de un producto después del lavado de éste en el mismo filtro.

Los filtros prensa pueden construirse con revestimientos especiales, en el caso de suspensiones corrosivas.

Las fases del proceso son:

- Llenado (10 a 20 % del ciclo total)
- Filtrado (introducción de la presión)
- Descarga (apertura del filtro y expulsión de las tortas)
- Limpieza (se realiza cepillando y aclarando la tela)

La duración oscila entre 2 y 6 horas.

La gran ventaja del filtro-prensa consiste en que pueden obtenerse sequedades elevadas sin pérdida de materias en la fase líquida. Con lodos residuales urba - nos, pueden alcanzarse sequedades comprendidas entre - el 35 y 55 % según la naturaleza del fango y el tipo - y grado de acondicionamiento. Su producción puede va - riar, en las mismas condiciones, entre 2 y 10 kg/m<sup>2</sup>.h.

En contrapartida, el inconveniente del filtro-pren - sa es su funcionamiento discontinuo. En los filtros de placas, era necesario separar manualmente las placas, - en la fase de descarga, sobre guías deslizaderas, de - forma que se desprendieran las tortas, unas después de otras. Ultimamente se ha automatizado.

La utilización de filtros prensa requiere, una mayor atención al sistema de alimentación y por tanto aumenta en complejidad su manejo. Son pues aconsejables para grandes instalaciones, donde se pueda contar con un personal de mantenimiento y explotación - adecuado que pueda regular certeramente los siguientes elementos:

- bombas de caudal regulable (membrana)
- depósitos de aire a presión con vaciado y llenado cíclico.
- bombas volumétricas.

#### 2.4.3 Centrifugación

Las centrifugadoras más utilizadas con lodos residuales procedentes del tratamiento de agua, son las decantadoras continuas, de eje horizontal.

En estas decantadoras, se efectúan de forma continua, tanto la alimentación como la evacuación del líquido claro y del sedimento. Están constituidas, - esencialmente, por un tambor cilindro-cónico o cónico de eje horizontal, que gira a gran velocidad, en cuyo interior, un tornillo helicoidal de extracción gira, a su vez, a una velocidad ligeramente distinta.- Este tornillo rascador se construye de acero especial protegido, en toda su superficie en contacto con el fango, por una capa de metal de gran dureza.

Las decantadoras continuas se distinguen, en primer lugar, por su forma de alimentacion: central o tangencial, y por el sentido de recorrido de la suspensión bruta y del sedimento: el mismo sentido o sentido contrario.

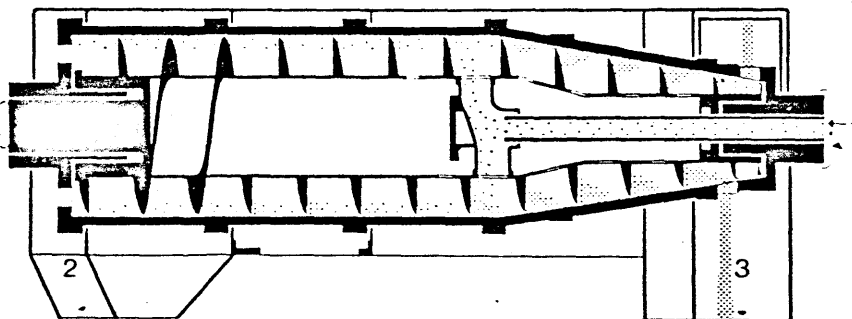


Fig. 2.4.3 Esquema de centrífuga

La figura 2.4.3 representa el esquema de una centrífuga horizontal con recorrido de el sedimento, en sentido contrario al del agua de centrifugado. La alimentación tangencial se hace por 1. y el lodo se expulsa por 3. El agua se elimina por 2.

Los factores de construcción más importantes para el buen funcionamiento de una decantadora continua, son:

- la forma geométrica del tambor,
- la velocidad de rotación del tambor
- la velocidad de rotación del tornillo
- el paso del tornillo.

El tambor debe ser cilindro-cónico; la parte cilíndrica corresponde esencialmente a la fase de decantación, y la parte cónica a la fase de transporte del sedimento hacia su evacuación. En el paso de la parte cilíndrica a la parte cónica, el sedimento se encuentra sometido a una fuerza de reflujo tanto menor cuanto menor es el ángulo del tambor. Esta fuerza no debe destruir la cohesión del fango espesado; en caso contrario, la extracción no será buena, o será de nuevo puesta en suspensión en el agua una cantidad importante de materia seca.

Puede reducirse también la fuerza de reflujo - disminuyendo la velocidad de rotación del tambor, pero no excesivamente, ya que la sequedad del sedimento puede llegar a ser insuficiente.

## S E G U N D A   P A R T E

=====

## E R A S   D E   S E C A D O

=====



3.- REVISION BIBLIOGRAFICA SOBRE FRAS  
=====

DE SECADO.-  
=====

### 3. REVISION BIBLIOGRAFICA SOBRE ERAS DE SECADO

#### 3.1. Introducción

El tema de las eras de secado, se expone en todos los tratados de aguas residuales, como el primer método de secado de lodos, dándole poca importancia y limitándose a definir los principales parámetros. Pero al considerar las variables que intervienen en su definición, es cuando aparece la importancia de una correcta definición de cada una de ellas, para un correcto funcionamiento del sistema. Por otra parte la observación en la realidad de que hay eras que funcionan perfectamente y otras que no cumplen su cometido, es cuando aparece la necesidad de definir las perfectamente.

#### 3.2. Eras de secado

##### 3.2.1. Definición

Son estanques con un fondo de arena sobre grava graduada, en los que se introducen los lodos para su secado. Dicho secado se produce por drenaje en el filtro y deshidratación por evaporación.

### 3.2.2. Descripción del proceso de secado

El lodo introducido en la era sigue el proceso de filtración y evaporación, de una forma característica. Este fenómeno está descrito en el Manual de Saneamiento de Poblaciones de Imhoff en la página 195 de una forma muy completa, siendo en general, no estudiado en las publicaciones revisadas. A continuación se incluye dicha descripción:

"Cuando se deja fluir sobre una era de arena al fango digerido húmedo para su desecación, los gases contenidos en él tienen una gran importancia. El fango estaba en la solera del digestor, en donde se coloca el tubo de fangos, que se encuentra bajo la alta presión del agua, y por consiguiente también sus gases. Al extraer el fango y salir por el tubo pierde esa presión las burbujas de gas se hinchan, y los gases que estaban disueltos en el agua de fango quedan libres. Así, el fango que sale es espumoso y su peso es menor que el del agua.

Cuando el fango llega en ese estado a una era de secado, sobrenada en su propia agua. Esto se comprueba fácilmente en una probeta cónica.

Por tanto, el fango digerido conteniendo gases - desprende su agua hacia abajo, al contrario que el fango desgasificado que cede su agua hacia arriba. Cuando hay que elevar el fango a la era de secado no se deben emplear bombas de aspiración que puedan desgasificarlo. Se preferirán calderines, profundos de aire o elevadores de aire comprimido. También se puede disponer un digestor secundario elevado en la era de secado. En digestores de una fase, provistos de instalación de recirculación, se puede dejar descansar el fango en la parte más baja para que se espese allí y pueda formar nuevos gases, antes de sacarlo.

La separación del fango de la masa principal de su agua es un hecho desde el primer día. A continuación sigue la desecación por evaporación en la primera o segunda semana. Por el aspecto de las grietas de secado se puede reconocer muchas veces cómo estaba constituido el fango líquido. Pocas grietas y delgadas se presentan en un fango pobre en agua y bien digerido que al sobrenadar en su propia agua no necesitaba modificar demasiado su estructura y únicamente sustituye su agua por aire. Grietas muy numerosas y de anchura regular indican un fango digerido que por su contenido en fango activado o en coagulantes era muy rico en agua y no tenía más solución que la evaporación para desprenderse de una gran parte de su agua.

Pocas grietas y muy anchas indican un fango pegajoso y mal digerido que solo se puede secar por evaporación durante un tiempo muy largo."

El Manual de Tratamiento de Aguas Negras del Departamento de Sanidad del Estado de Nueva York, describe también el fenómeno de la flotación, reseñando su importancia en la fase de drenaje que indica que suele durar las 12 o 18 primeras horas.

Para mejorar el drenaje se recomienda el uso de floculantes (1 kg. de alumina por 2 m<sup>3</sup>. de lodo)

### 3.2.3 Forma de las eras.

Las eras suelen ser rectangulares. La profundidad de la balsa permitirá la introducción del lecho de arena y la lamina de lodo que se vaya a desecar.

La superficie de era de secado se divide en módulos por las razones siguientes:

- a) Operatividad: hay que tener en cuenta que el lodo se va produciendo continuamente y que su eliminación se hace de una forma periódica, por tanto al tener que llenar la era has

ta una altura determinada, es necesario que con una cantidad no muy grande de lodos (de 10 a 30 m<sup>3</sup>.) se llene un módulo.

b) Drenaje: al existir un sistema de drenaje independiente para cada módulo el recorrido de una gota de agua desde el punto más lejano al tubo principal no debe de exceder de 3m.

- Imhoff recomienda que el rectángulo oscile entre 4 y 6 m. de ancho, siendo la longitud indefinida.
- Degremont fija como límites 8 m. de ancho y 20 de longitud.
- Paz Maroto y Paz Casañé fijan el ancho entre 4 y 5 metros.
- Fair, Geyer y Okun recomiendan no sobrepasar los 6 metros de ancho ni los 30 m. de longitud.

Todos estos autores suponen estas limitaciones para pequeñas plantas y con un solo punto de alimentación. Hay que tener en cuenta que las dimensio-

nes se ven limitadas por la necesidad de un llenado rápido, para que se pueda formar una capa de lodos-considerable en reposo para que funcione el mecanismo de flotación.

#### 3.2.4 Granulometría de la masa filtrante.

Degremont propone una capa filtrante de arena de "10 cm. de espesor de 0,5 a 1,5 mm., dispuesta - sobre una capa soporte de 20 cm. de grava de 15 a - 25 mm."

El Manual del Estado de Nueva York da un espesor de capa soporte de 30 cm. y una capa filtrante- de 15 a 22,5 cm. de "arena limpia"

Fair solo indica que la capa de "arena para - filtro" tendra un espesor de 10 a 16 cm. sobre una- capa soporte de grava.

Imhoff la describe de la siguiente forma:

« Las eras de secado están formadas por 25 cm.- de espesor de escoria o de cascote en tres capas, - de modo que la más gruesa esté debajo, y la más fina, encima. Sobre la capa superior se pone otra de- 10 cm, por lo menos, de arena o de menudo de cok. -

En América se emplea arena de 0,3 a 0,5 mm. de tamaño eficaz y coeficiente de uniformidad inferior a 5. La arena se va yendo poco a poco con el lodo.

P. Aarne Veselind (Treatment and Disposal of Wastewater Sludges) indica que se dispondrá 6 pulgadas de "arena fina" sobre una capa de 3 pulgadas de "arena gruesa" colocadas sobre un soporte de grava fina, media y gruesa cada una de 3 pulgadas.

### 3.2.5. Superficie necesaria.

El cálculo de superficie necesaria se plantea de dos formas o partiendo de tablas que nos dan directamente la superficie necesaria o a partir del volumen de lodo producido (depende del proceso y la carga contaminante del agua) y suponiendo el número de veces que se puede llenar una era al año con una altura de lodo dado.

Imhoff supone una altura de lodo de 20 cm. y que se puede llenar 7 veces al año una era. En este supuesto obtiene 0,067 m<sup>2</sup>. por habitante, equivalente a 15 habitantes por m<sup>2</sup>. suponiendo una producción de lodo de 0,26 l./hab.día en una instalación con solo una decantación primaria y digestión. Con lechos bacterianos obtiene 10 hab./m<sup>2</sup>. y con activación de lodos 5 hab./m<sup>2</sup>.



Degremont supone que el ciclo de secado es de un mes (12 veces al año) pero advierte que la climatología puede reducirlo a 3 o 4 veces al año.

Paz Maroto y Paz Casañé, consideran que la utilización normal de las eras es de 9 veces al año. Consideran que un tratamiento de lodos activados requiere - un metro cuadrado para 15 a 20 habitantes y para nuestro clima la media puede estar entre 20 y 35 habitantes por metro cuadrado. También citan las especificaciones dadas por los americanos, que coincide con las cifras dadas por otros autores (Aarne Veselind, Manual de Nueva York.

Las necesidades de superficie son:

TRATAMIENTO	HABITANTES POR METRO CUADRADO	
	DESCUBIERTOS	CUBIERTOS
Primario	10	14
Lecho bacteriano	7	8
Lodos activados	6	8
Tratamiento químico	5	7

El Manual de Tratamiento de Aguas Negras (N.Y.) indica que estas cantidades estan calculadas para una latitud comprendida entre los 40 y 45° debiendose dis

minuir o aumentar en un 25% por debajo y por encima de dichas latitudes.

En Inglaterra según Veselind varían los habitantes por metro cuadrado de 3 a 2. Es importante constatar este dato dado la climatología de este país, que nos da la influencia de la humedad en el secado.

En cuanto a la altura de lodos que se debe verter en las eras, oscila entre 20 y 30 cm.

- Veselind indica que debe estar comprendido, entre 6 y 12 pulgadas (15,24 a 30,48 cm.)
- Imhoff y el Manual de Tratamiento de Aguas Negras del Estado de Nueva York lo sitúan en 20 cm.
- Degremont indica que debe ser del orden de 30 cm.
- Paz Maroto y Paz Casañé lo sitúan también en 20 cm.

### 3.2.6. Humedad de los lodos.

Los lodos que se van a secar, tienen una humedad muy variable dependiendo del proceso de depura -

ción seguido y sobre todo la existencia de un espesa  
miento previo.

Para Vaseline la concentración de los lodos -  
es la siguiente:

	%
Lodos primarios	4 - 8
Lodos primarios digeridos	6 - 10
Lodos activados	0,5 - 1,5
Lodos primarios más activa <u>dos</u> digeridos.	2 - 4
Lodos químicos	0,5 - 1,5

Imhoff da unas concentraciones más altas:

Lodos primarios digerido	13
Lodos primarios más acti <u>va</u> dos digeridos.	7

Fair propone las siguientes concentraciones:

	%
Lodos primarios	2,5 - 5
Lodos primarios espesados	8 - 10
Lodos primarios digeridos	10 - 15
Lodos activados	0,5 - 1
Lodos primarios más activa dos digeridos.	6 - 8

En cuanto a la humedad de los fangos secos, los autores Paz Maroto y Paz Casañe e Imhoff la sitúan en un 55%.

Degremont dice que pueden conseguirse secueda - des hasta de un 65%.

El Manual del Estado de Nueva York afirma que - con una humedad de 60 al 70% la torta de lodo es mane - jable a pala.

### 3.2.7. Retirada de los lodos secos.

La retirada de lodos secos, se realiza general - mente a mano, sobre todo en las plantas pequeñas.

Todos los autores recomiendan accesibilidad de las eras y facilidad de almacenamiento y extracción.

En las grandes instalaciones se mecaniza la recogida, indicando Degremont que se incrementa en un 50% la "capacidad industrial" de secado de las eras.

El Manual de Tratamiento de Aguas Negras del - Estado de Nueva York da las indicaciones prácticas - como:

- Si la retirada se hace a mano y con carretilla hay que disponer andenes para la circulación así como de tablonos para poder circular por la era.

- La mejor herramienta para la recogida a mano - es un rastrillo con los dientes separados 2,5cm.

- Si entran camiones en las eras, grandes instalaciones, deben tener caminos de radadura de hormigón. Los vehículos oruga no dañan los lechos.

La recogida mecanizada requiere una fuerte - inversión ya que hay que disponer un sistema que - tenga un rascador que vaya separando el lodo de la arena y lo va almacenando en depósitos laterales. - Es de gran complejidad.

Una vez separados del lecho se pueden cargar directamente a camión o almacenarlos en tolvas especialmente concebidas para ello. El transporte se puede realizar por medio de cintas transportadoras de goma.

### 3.2.8. Otros factores a considerar.

La lluvia es un factor que según varios autores, si no es excesiva, no tiene gran importancia en el proceso de secado. Se abren las grietas al iniciarse el secado y la lluvia pasa directamente al filtro de arena y al no producirse un lavado intenso se filtra el agua a una gran velocidad.

El hielo, según Paz Maroto y Paz Casañé, puede ser no perjudicial pues al deshelarse el lodo cede su humedad con mayor rapidez.

Otro factor considerado es la posibilidad de cubrición de las eras. Se indica que se puede doblar la capacidad de la instalación. Pero también hay que tener en cuenta que la ventilación ha de ser perfecta, pues si no, funciona mejor en tiempo seco una era abierta que cerrada. La reposición de arena es un factor a considerar y solo en el Manual del Estado de Nueva York fija en 2,5 cm. por año.

### 3.3. Conclusiones.

De la revisión bibliográfica anteriormente -  
expuesta se pueden sacar las siguientes conclusiones:

- 1º) El tema es tratado sin mucha profundidad en -  
los textos de aguas residuales.
- 2º) Se consideran las eras de secado como el pri  
mer método de deshidratación de lodos y por-  
tanto se recurre a la experiencia para su di  
mensionado.
- 3º) La forma de las eras se las dimensiona aten-  
diendo al drenaje, cuando la limitación es -  
operativa. No se pueden llenar continuamente.
- 4º) La superficie necesaria es muy variable pues  
oscila de 2 a 35 habitantes por metro cuadrado  
de era. Es decir se deja al proyectista un -  
campo muy amplio, 17,5 veces, lo cual condu-  
ce a infradimensionar las instalaciones.
- 5º) La altura de lodo sobre era se situa entre -  
los 20 y 30 cm.

- 6º) La pérdida de humedad de los lodos se debe a un proceso de filtración-evaporación pero no se describe ni se estudia dicho mecanismo. El efecto de la lluvia no se considera prácticamente y no se menciona la climatología, factor esencial en el secado de sólidos al aire libre por evaporación de agua mediante corrientes de aire seco.
- 7º) El estudio de la filtración prácticamente es nulo y no se define la granulometría del medio poroso ni su necesaria reposición.

Las eras de secado de lodo se pueden considerar de escasa aplicación en las nuevas depuradoras, que se construyan para poblaciones de más de 25.000 habitantes, no ocurre así, en las pequeñas poblaciones, ya que su instalación es obligada. Pero la existencia de gran cantidad de estos núcleos, hace que crezca la importancia del saneamiento de sus aguas. La perfecta depuración del agua residual, si la eliminación de los lodos es deficiente, puede repercutir en una evacuación periódica de un efluente de lodos al cauce. Esta operación



bastante frecuente, anula todo el efecto del tratamiento, pues aunque digerido los lodos, una contaminación tan elevada y en poco tiempo hacen mucho más pernicioso su efecto.

Perfeccionar e intentar mejorar los parámetros, que definen un elemento de un proceso técnico es una razón suficiente - para que se inicie el deseo de realizarlo por parte del autor, pero además en los - cinco años de actividad profesional en - este campo, ha encontrado siempre que el tema de las eras de secado no era abordado con la suficiente intensidad en las publicaciones consultadas. Es decir al surgir una dificultad, (falta de superficie) e - intentar corregirla se ha encontrado falta de apoyo bibliográfico y al tener que redactar una tesis doctoral ha sido el momento de poder profundizar y desmenuzar, - dentro de las limitaciones propias, y sacar conclusiones que puedan servir en futuro a personas interesadas en el tema.

4. DETERMINACION DE LOS PARAMETROS FUNDAMENTALES DEL  
DIMENSIONADO DE ERAS DE SECADO.  
=====

#### 4. Determinación de los parámetros fundamentales del - dimensionado de eras de secado.

##### 4.1. Introducción.

Como contribución original al conocimiento del tema, se pensó en un principio en un desarrollo comparativo con otros métodos de secado de lodos. Pero en el desarrollo del trabajo fué apareciendo paulatinamente la necesidad de profundizar en la propia definición de las eras de secado. Dentro de su sencillez y las pocas variables - que se manejan, un error de proyecto puede repercutir en la no funcionabilidad y operatividad de la era.

Un tema que rápidamente destacó, por su importancia y lo poco estudiado que estaba, fué la granulometría del filtro y las limitaciones de tamaño de la area.

El estudio de la superficie necesaria se trataba generalmente como consecuencia de una revisión de datos empíricos. Apareció rápidamente la importancia que tiene la climatología en su definición y la posibilidad de conocida ésta deducir el tiempo necesario de secado que junto con el volúmen de lodos a secar producidos nos darán la cantidad de superficie necesaria.

El fenómeno de evaporación planteó la duda de que era más importante si el aporte de energía por radiación solar o el secado por corriente de aire a una velocidad dada y con un grado de humedad variable.

El funcionamiento de la masa filtrante planteó la duda de si se podría asimilar a un filtro lento de aguas potables.

Todas estas consideraciones conducen a afirmar que procesos que en el desarrollo de la técnica se consideran rutinarios y de los cuales se tiene una gran experiencia con el tiempo pierden calidad en su ejecución y bajan los rendimientos. No quiere el presente trabajo revisar una experiencia que se ha manifestado efectiva, sino aportar un estudio de ella y sacar las consecuencias y conclusiones que puedan orientar al proyectista y asegurar una aceptable explotación.

#### 4.2. Descripción del proceso.

##### 4.2.1. Volúmen de lodos.

En cuanto al volúmen de lodos hay que tener en cuenta, que es una consecuencia lógica del pro-

ceso a que se somete el agua residual. Influirá también el rendimiento del proceso. En la página 13 se incluye la tabla dada por Imhoff donde se establece la producción de lodos en litros por habitante y por día. Dichas cifras contrastadas en las plantas del Ayuntamiento de Madrid nos parecen aceptables con dos puntualizaciones:

- 1º) La cantidad de lodo sin digerir, nos parece un poco alto. (30% de incremento sobre las cifras obtenidas en la práctica).
- 2º) La reducción debida a la digestión es muy fuerte debido a que supone una fuerte concentración, aparte de la destrucción de sólidos que se originan en el proceso (0,65%)

Por tanto se puede tomar como cifra válida para un proceso de depuración biológica la cantidad de 0,50 litros habitante día y para oxidación total la cantidad de 0,24 litros habitante y día.

Es decir que por habitante y año precisaremos un volumen de era igual a 182,5 litros y 87,6 litros respectivamente.

Insistimos una vez más que este dato es consecuencia lógica de un proceso y por tanto al diseñar una-

Estación Depuradora se dispondrá de él en el momento - en que se plantee el problema del secado de los lodos.

#### 4.2.2. Conducciones de lodo y llenado de eras.

Las conducciones de lodo deben ser lo más accesibles posibles. Su principal enemigo son los atascos. Por esta razón es recomendable la utilización, donde sea posible canales abiertos mejor que tuberías. Para su cálculo se puede usar la fórmula (2.2.1.) con las características de los lodos allí definidos en cuanto a viscosidad y densidad.

En las figuras 4.2.1 y 4.2.2. se muestra el tipo empleado de canaletas y arqueta de reparto y vertedero.

Es muy importante que el vertido se haga sobre una superficie de hormigón y no sobre la arena. Se podría producir un levantamiento de arena, al verter directamente, que podría lograr al cabo del tiempo la "perforación" del filtro. Es un detalle constructivo de gran importancia.

El llenado se realiza de una forma paulatina, - como muestra la figura 4.2.3. y hasta, que se llegue a la altura deseada o hasta que lleguen los lodos a la cota del canal. (fig. 4.2.4.)



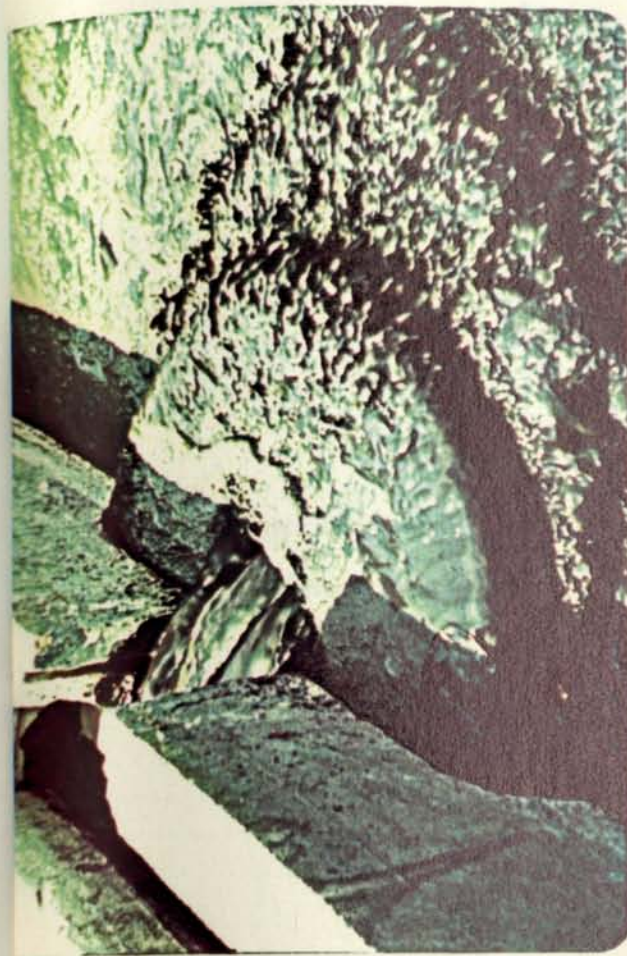


Fig. 4.2.1. Canaletta de reparto y vertedero



Fig. 4.2.3. Llenado de era

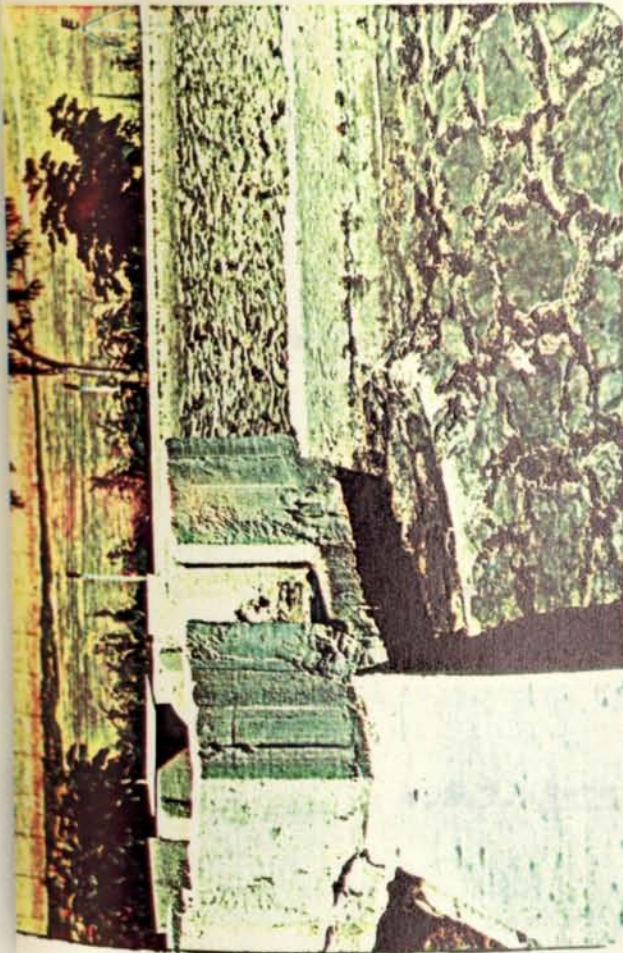


Fig. 4.2.2. Arqueta de reparto y vertedero

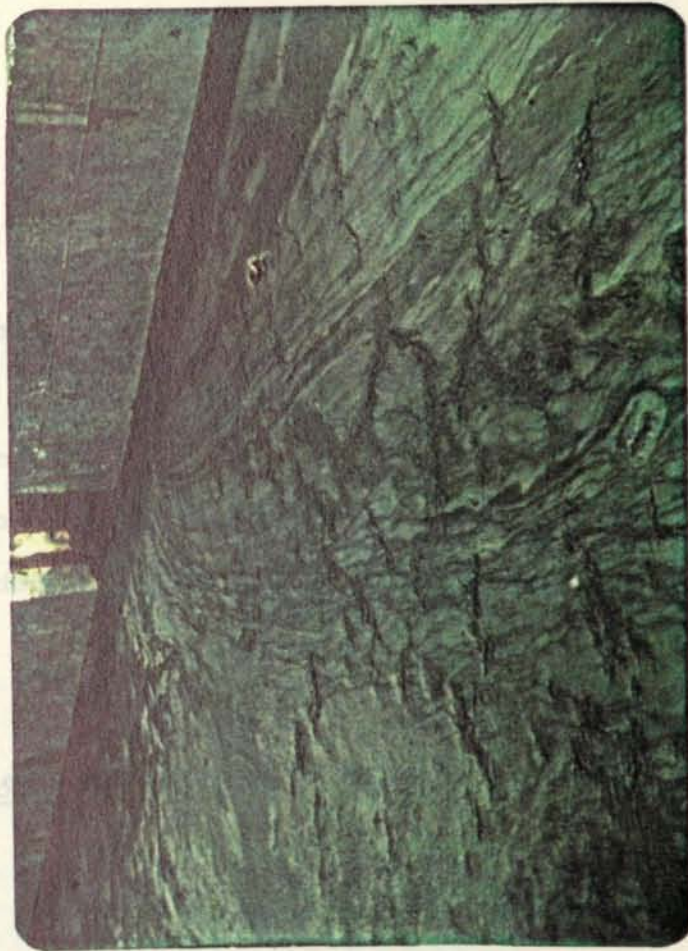


Fig. 4.2.4. Era recien llenada



La velocidad de entrada del lodo en la era debe ser lenta para que no produzca arrastres de arena.

Es importantísimo que el sistema de conducción y llenado asegure la homogeneidad del lodo y la permanencia en su interior del gas, tan importante para el proceso de flotación.

#### 4.2.3. Separación por flotación de sólidos.

Una vez el lodo queda en reposo en la era, se produce el fenómeno de desprendimiento de gases (fig. 4.2.5.) que produce una separación por capas de la masa vertida (Fig. 4.2.6.)

En los ensayos realizados para la redacción de esta tesis se llegó a los siguientes resultados:

- Concentración del lodo 3,3%

A los veinte minutos de iniciado el ensayo se produjo el fenómeno quedando los 20 cm. iniciales de lodos divididos en dos capas:

- a) Capa de lodo concentrado al 7,8% de 14 cm. de altura.
- b) Capa de agua de 5 cm. de agua con una concentración del 1,5%.



En la figura 4.2.6. se aprecia que sobre la arena se deposita una capa de sólidos decantados, que dificultan la filtración. Producen un atascamiento del-filtro. Los sólidos no penetran en la masa del filtro más que décimas de milímetro.

#### 4.2.4. Filtración.

Desde el inicio del proceso se produce una filtración de parte del agua que contiene el lodo. Empieza con una velocidad del orden de 3 a 9 litros por - metro cuadrado y hora y a medida que se va atascando-el filtro va bajando hasta llegar a estabilizarse entre 0,5 y 1,5 litros por metro cuadrado y hora. El - filtrado rapido se produce en las primeras 6 horas y-el lento hasta el tercer dia. En la figura 4.2.7. se-aprecia la salida continua de liquido en la era expe-rimental y la poca penetración de los sólidos en la - masa de arena. Experimentalmente, se ha determinado - que el agua que se pierde por filtración equivale apro-ximadamente a un 70% del volumen de lodo filtrado. El lodo con el que se realizó la comprobación tenía una-concentración del 4%. Por tanto la humedad relativa - sería de:

$$\frac{30 - 4}{30} = 0,86$$

Es decir que concuerda con la determinación obtenida en el Anejo 1 para el ensayo (E 09.76) que obteníamos un lodo de 82% de humedad. La diferencia del 4% con el ensayo, está en que con 100 horas de secado ya ha perdido esta cantidad por evaporación.

El agua de filtrado según los resultados obtenidos en el ensayo reflejado en el Anejo 1. apartado - 1.4.2. son inferiores en 100 p.p.m. en sólidos. Como los lodos tenían una concentración de 33253 p.p.m. la reducción es del 99,75%

#### 4.2.5. Evaporación

Por filtración hemos dicho que se pierde el 70% del agua, pero para llegar a una humedad del 55% hemos de eliminar todavía un 20%. El único medio es la evaporación.

Podría parecer que se elimina por un aporte de energía calorífica solar por radiación. Pero el principal sistema de eliminación de humedad es el producido por el aire seco con una humedad relativa inferior. El aire al pasar por la superficie de la era - seca la torta de lodo. La capacidad de secado del - aire en determinadas condiciones llegará hasta la hu

medad de equilibrio del lodo. Esta humedad sería a la que se llegaría con un secado de tiempo infinito sin variar las condiciones.

Al secarse la superficie de la torta de lodo por capilaridad va subiendo el agua y se va secando - toda ella. Este fenómeno está estudiado en el apartado 2.3.5. de una forma teórica, suponiendo que se conoce el grado de humedad del aire de secado y su velocidad de circulación.

En la práctica no se puede establecer una curva característica de desecación, ya que varía el producto a secar y las condiciones del aire de secado.

Al bajar la humedad del 80% empiezan a aparecer unas grietas en la masa del lodo (fig. 4.2.8.) - por donde se sigue activando el contacto lodo.

La influencia de la velocidad del aire en el secado se ha constatado en el ensayo realizado con - unas eras experimentales en las que las E.01 y E.02 - no podía penetrar el aire por ser cilíndricas alargadas y las E.03 y E.04 que eran un cilindro aplastado. Las humedades a los catorce días eran respectivamente (Anejo 1.4.1) del 75% en las que no había aireación y 54% en las que sí había.





Fig. 4.2.5. Gases de los lodos

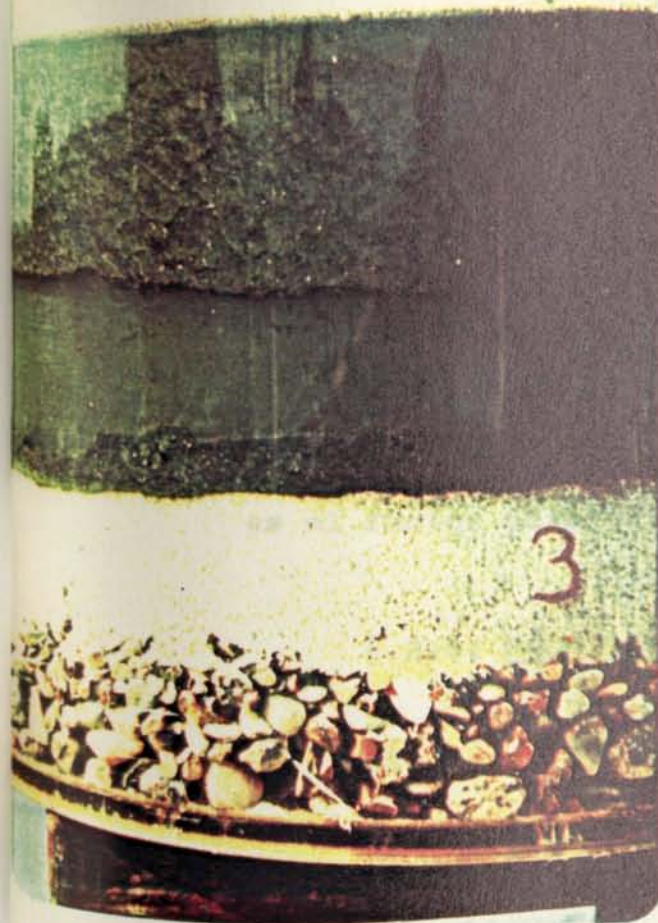


Fig. 4.2.6. Zonas de lodos y agua



Fig. 4.2.7. Fenómeno de Filtración

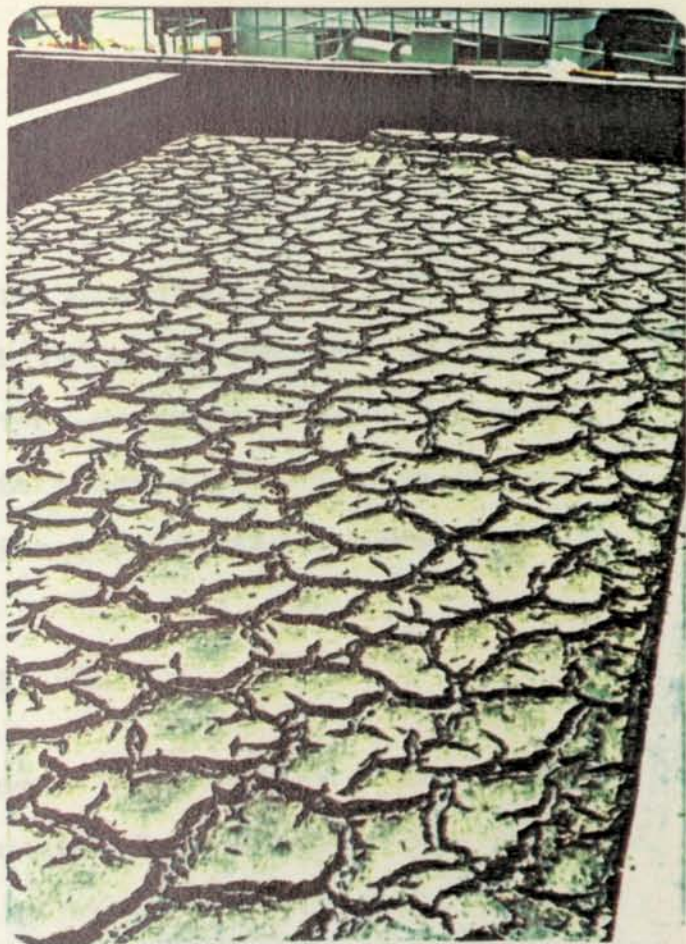


Fig. 4.2.8. Agrietamiento de la torta



Según las condiciones climatológicas se puede - llegar a una humedad del 55% en un periodo de 15 a 20 dias. Hay que tener siempre en cuenta que no se puede bajar a una humedad inferior a la del aire. Este es el factor climatológico que limita el secado.

#### 4.2.6. Retirada de lodos.

Al llegar a una humedad del 60% se pueden manejar los lodos a pala o rastrillo. Es mejor la segunda herramienta, pues se pierde menos arena.

Generalmente si no hay escasez de eras, se suelen amontonar en una de ellas, donde sigue perdiendo humedad, pudiendo llegar a convertirse en pulvurulento. También se suele utilizar en Estaciones más grandes, tolvas de almacenamiento. Suelen ser elevadas, - para poder cargar sobre camión por gravedad. Para - acarrearlos a las tolvas, se usa generalmente cintas-transportadoras de goma.

La retirada de lodos, es una operación sencilla si ha sido prevista por el proyectista. Por lo tanto es recomendable dejar andenes amplios donde puedan - maniobrar los vehiculos.

Si la retirada es mecánica las eras pueden estar a nivel del suelo. Pero si va a ser manual conviene - que esten elevadas para que el esfuerzo para la carga a camión sea mínimo.

#### 4.2.7. Renovación del filtro.

Una vez utilizada la era hay que dejarla libre - de restos de lodos secos. Rastrillar la arena y conseguir una superficie lo más plana posible.

Con la retirada del lodo la capa de arena que - está en contacto con él se queda pegada y por tanto - se pierde. Es decir, hay que preveer una reposición - de arena. Teniendo en cuenta que el espesor de arena - que queda pegada es de unos dos milímetros, hay que - reponer 20 litros de arena por metro cuadrado de era.

Esta operación equivale al lavado y reposición - de un filtro de agua potable. Como se ha podido apreciar en los ensayos, los sólidos no penetran más de - dos milímetros en la masa del filtro, que son precisamente los que se pierden en la retirada, por tanto se produce un lavado.

Es también conveniente que entre dos ciclos de secado, se produzca un lavado con agua limpia de la era. Si se producen lluvias, quedan lavadas las eras de una forma natural.

#### 4.3. Determinación de parámetros.

##### 4.3.1. Introducción

La determinación de los parámetros de diseño de las eras de secado se realiza, basándonos en dos metodologías:

- a) Recopilación de la experiencia del autor, - en la explotación de Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales.
- b) Ensayos de laboratorio y en eras en modelo reducido realizadas

Es decir es una combinación, en que la experiencia se contrasta y se razona pasando de ser un método empírico a uno analítico.

#### 4.3.2. Dimensiones de la era.

No existe más limitación que la de la operatividad.

El drenaje se puede hacer satisfactoria - mente con cualquier forma que tenga la era. Todo es - cuestión de calcular los diámetros de las conducciones capaces de transportar los máximos caudales instantáneos.

Lo que nos limita las dimensiones de las - eras es:

- a) Volumen de lodo que podamos disponer de - una vez.
- b) Velocidad de circulación del lodo en la - era para que no se produzcan arrastres.
- c) Posibilidad de formar en un tiempo corto - un manto de lodos en el que se pueda pro - ducir el fenómeno de la flotación. El -- tiempo idóneo pueden ser 10 minutos.

Un módulo ideal puede ser de 5 x 12 m. que nos da una superficie unitaria de 60 m<sup>2</sup>. que llenados - hasta una altura de 20 cm. representa una velocidad de llenado de 25 l/sg.



Las pendientes del fondo de la era serán - como mínimo del 3% para facilitar el drenaje.

Los muretes laterales no sobresaldrán, más de 50 cm. sobre el lecho de arena, pues perjudicaría el efecto de secado producido por la corriente de aire seco.

#### 4.3.3. Granulometría del filtro.

Se han realizado ensayos en los que se ha - determinado la granulometría de las arenas usadas en El Pardo y Manoteras.

La granulometrias expuestas en el anejo nº2 nos indican que un filtro idóneo, debe tener una talla efectiva, entre 0,2 y 0,4 mm. y un coeficiente de uniformidad inferior a 4.

Con estas granulometrias se han determinado las velocidades de filtración obteniéndose la curva - que se representa en la fig. 4.3.1. apoyándonos en los resultados relacionados en el anejo 1 apartado - 1.5.

De ella deducimos, que en las primeras 8 - horas es de aproximadamente 4 litros por metro cuadrado y hora y que hasta los tres días siguientes se man

tiene en 1 litro por metro cuadrado y hora.

Para estudiar el comportamiento de otras granulometrías, se construyeron las eras experimentales E.01-E.02. E.03 y E.04 con áridos, tallas efectivas 0,23, - 0,79, 0,36 y 0,23. Los resultados obtenidos nos indican que no se obtiene una mejora de resultados. La velocidad de filtración prácticamente mejora un 50% en los primeros instantes, pero después se iguala a la de los otros ensayos.

Para reconsiderar estos resultados se realizó el siguiente experimento:

En cuatro conos Imhoff se colocó cuatro granulometrías diferentes.

Nº 1. coeficiente de uniformidad 1,60  
talla efectiva 0,79 mm.

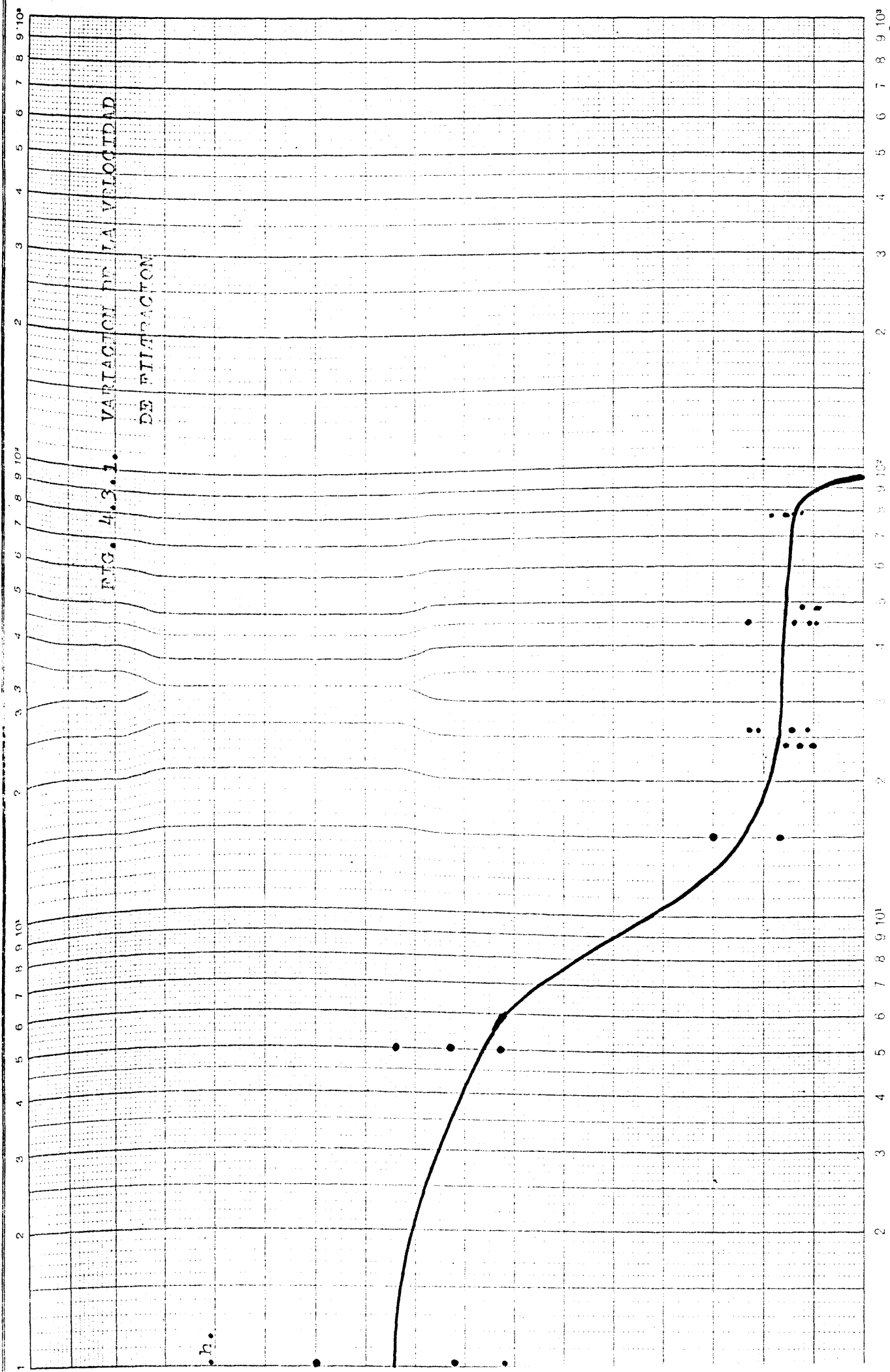
Nº 2. arena comprendida entre 3, 4 y 1,7 mm.

Nº 3. gravilla comprendida entre 3,4 y 7,8 mm.

Nº 4. gravilla superior a 7,8 mm.

En la figura 4.3.2. se aprecia la granulometría de los áridos al estar los conos vacíos.

FIG. 4.3.1. VARIACION DE LA VELOCIDAD  
DE FILTRACION





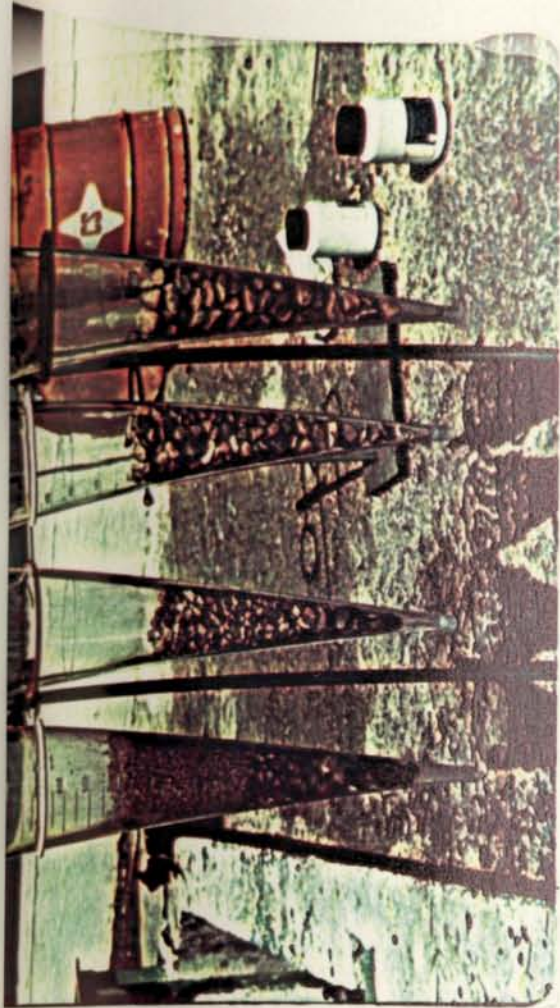


Fig. 4.3.2. Conos con cuatro clases de arenas.



Fig. 4.3.3. Inicio de la filtración

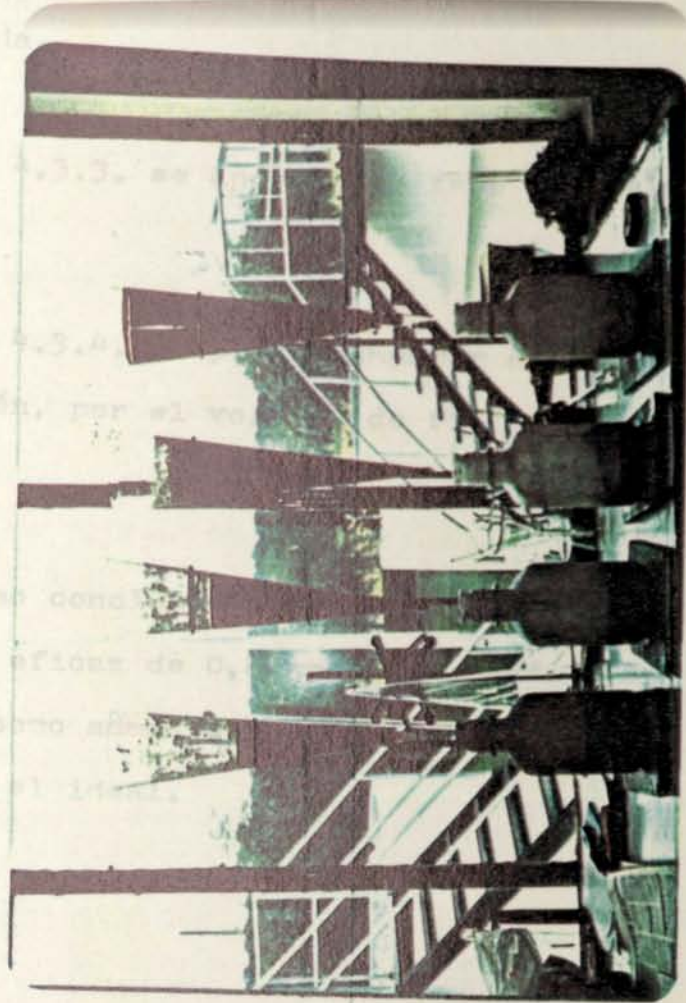


Fig. 4.3.4. Volúmenes de filtrado



Fig. 4.3.5. Eras experimentales

Se llenaron con un mismo lodo y se obtuvieron los siguientes resultados:

Nº 1 funcionó perfectamente aunque penetraron sólidos hasta la grava.

Nº 2 retención menor que el anterior, pero la masa filtrante quedó completamente inundada de sólidos.

Nº 3 prácticamente no funcionó como filtro.

Nº 4 no retuvo nada.

En la figura 4.3.3. se aprecia la fase inicial del ensayo.

En la figura 4.3.4. se puede comparar el rendimiento de la operación, por el volumen de filtrado recogido.

Por tanto como conclusión, se pueden admitir arenas con una talla eficaz de 0,8 mm. y un coeficiente de uniformidad 2 como admisibles, sabiendo que su comportamiento no es el ideal.

Un experimento interesante, ha sido el comprobar el correcto funcionamiento como filtro de una arena que proviene del arenero de la Estación Depuradora de Manóteras. Corresponde al Ensayo E.01 y a la curva granulométrica de referencia MA. 01.01.

Otro dato interesante es que en el ensayo E.03 - se usó arena de filtro graduada para aguas potables. - Los resultados obtenidos nos indican que no es necesaria una arena de tan alta calidad, sobre todo teniendo en cuenta el factor precio.

Luego podemos afirmar que las limitaciones impuestas al principio de este apartado, se pueden cumplir - con una arena de río lavada o también con una arena de arenero de Estación Depuradora.

Otra conclusión es que no se puede aplicar la - teoría de filtración de aguas potables, a las eras de - secado por los siguientes motivos:

- a) La velocidad de filtración es bajísima  $0,001 \text{ m}^3/\text{m}^2$ . hora. Es decir 200 veces inferior.
- b) La lámina de agua es también mucho más pequeña, de 5 a 10 veces.
- c) La capa de arena también guarda la misma relación

- d) El agua filtrada, no se puede considerar agua en proceso de tratamiento.

Por tanto lo que en realidad ocurre es un drenado, no pudiéndose hablar de depresiones, colmatado de filtros en otras analogías.

#### 4.3.4. Reducción de volúmen

El secado de los lodos lo que persigue es hacerlos manipulables. Se consigue a base de hacerlos perder humedad y también volúmen.

Es interesante resaltar que para algunos usos los lodos es necesario que pierdan el agua, como por ejemplo si se van a reutilizar para abonos agrícolas. Pero en otros casos, transporte a vertedero, no es im prescindible. La ventaja del secado es que reduce el volúmen de los lodos y con ello abarata el transporte

Para determinar la reducción de volúmen se ha hecho un seguimiento tanto en eras experimentales, - como eras en explotación. Los resultados se han relacionado en el anejo 1 apartado 1.3.

Se ha podido determinar que para eras de secado con una altura de lodos entre 20 y 30 cm. en un clima como el de Madrid a partir del decimo día, se llega a una reducción del 75% del volúmen inicial.



Todos los resultados obtenidos se han grafiado en un espacio semilogarítmico, pudiéndose estimar - que responden a una ley que se compone de tres líneas rectas.

De las cero horas hasta las 48 horas responde a la ecuación

$$C = 0,93 - 0,15 \log.h. \quad (4.3.1)$$

De las 48 horas hasta las 270

$$C = 1,71 - 0,061 \log.h. \quad (4.3.2.)$$

De las 270 horas en adelante  $C = 0,25$

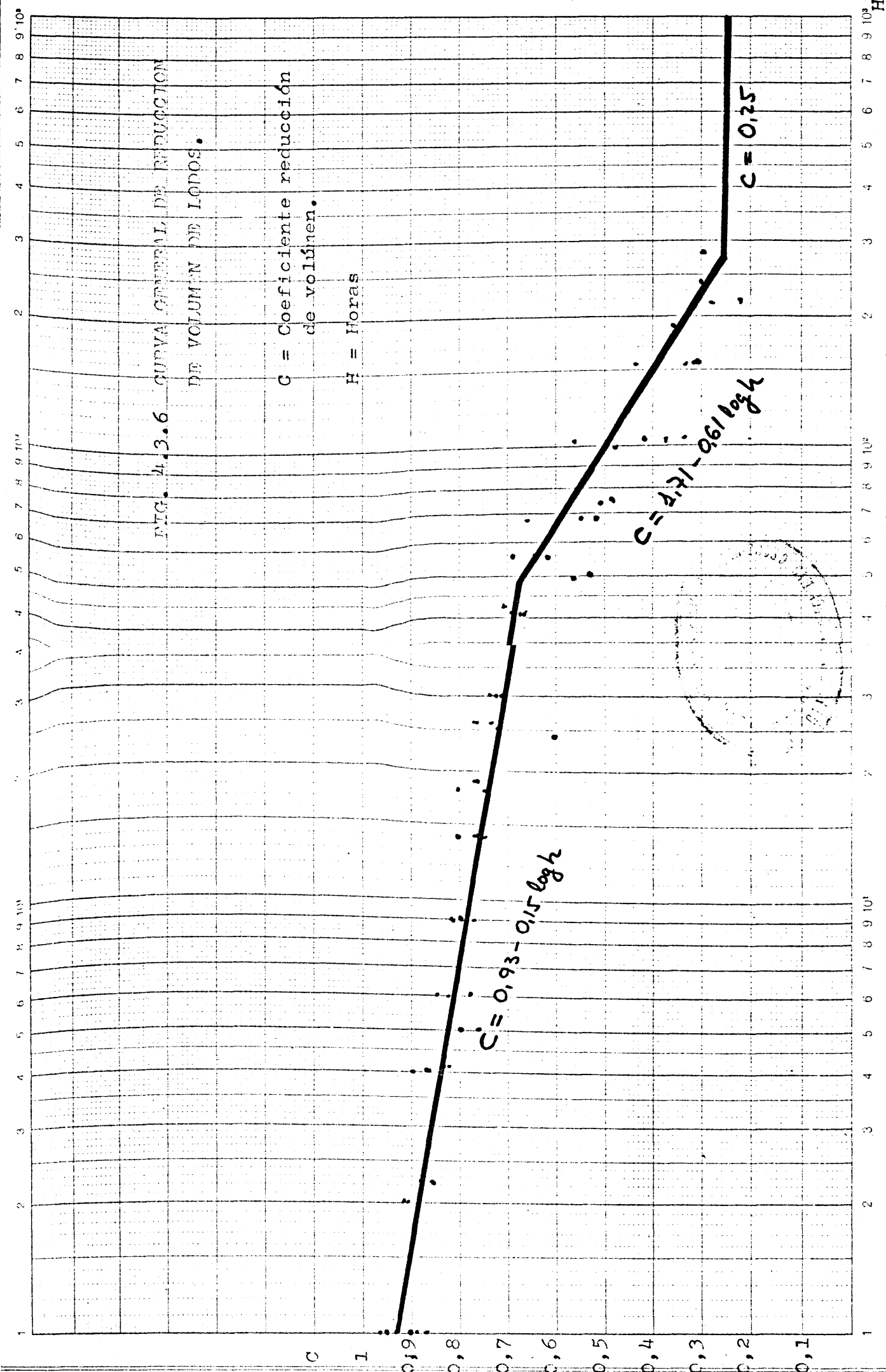
Siendo:  $C$  = Coeficiente de reducción de volúmen

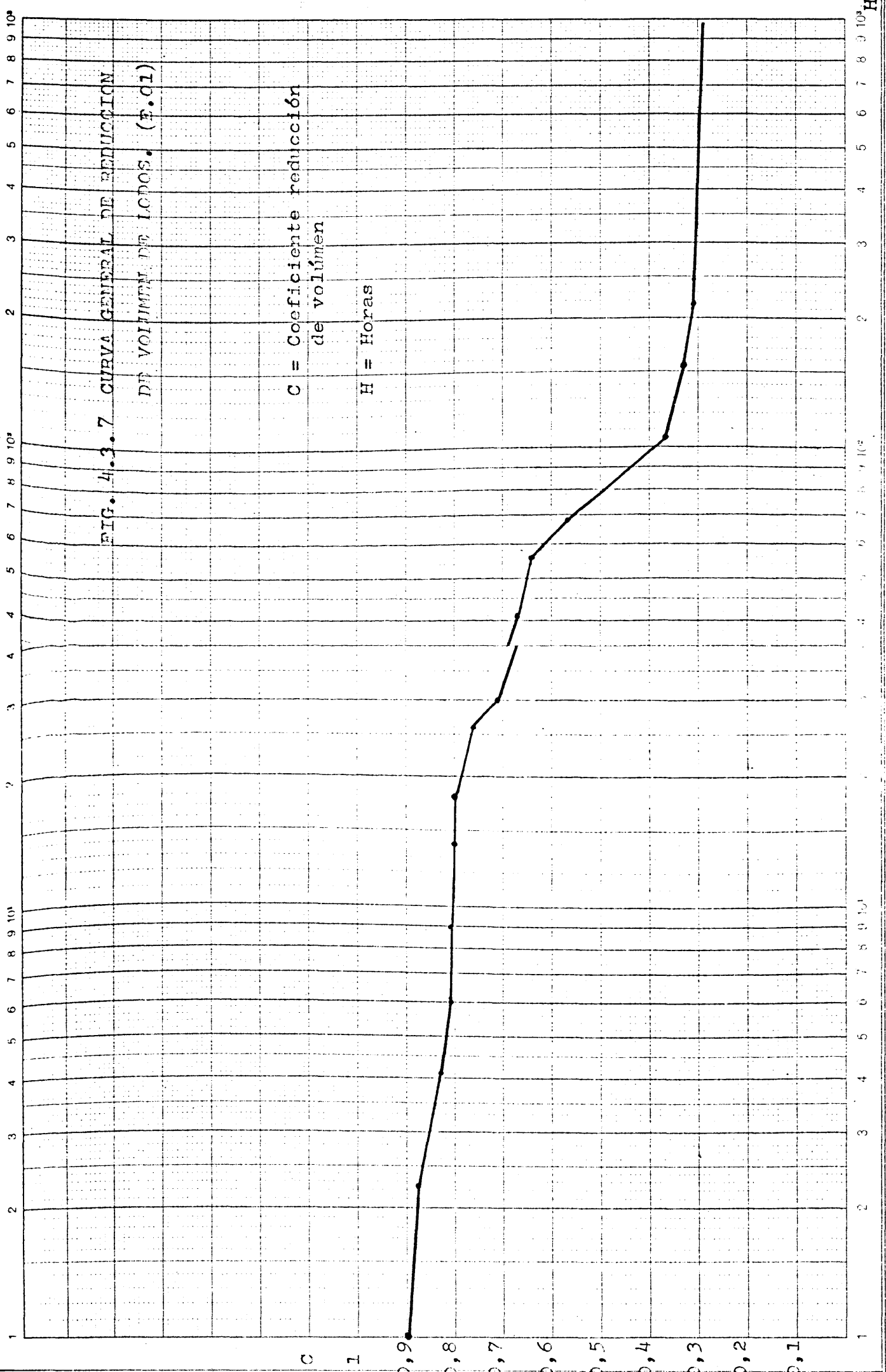
$h$  = Tiempo en horas de la iniciación - del proceso.

Estas curvas son las representadas desde la figura 4.3.6. a la figura 4.3.14 donde se indica la referencia a los ensayos que corresponden de los descritos en - los anejos anejos 1 y 2.

Podemos observar que el incremento de altura de lodos sobre era retarda la consecución de la reducción pero no la cuantía final. Es decir el elevar el llenado de una era nos va representar un incremento de tiempo - de secado pero la reducción de volúmen va a ser la mis-







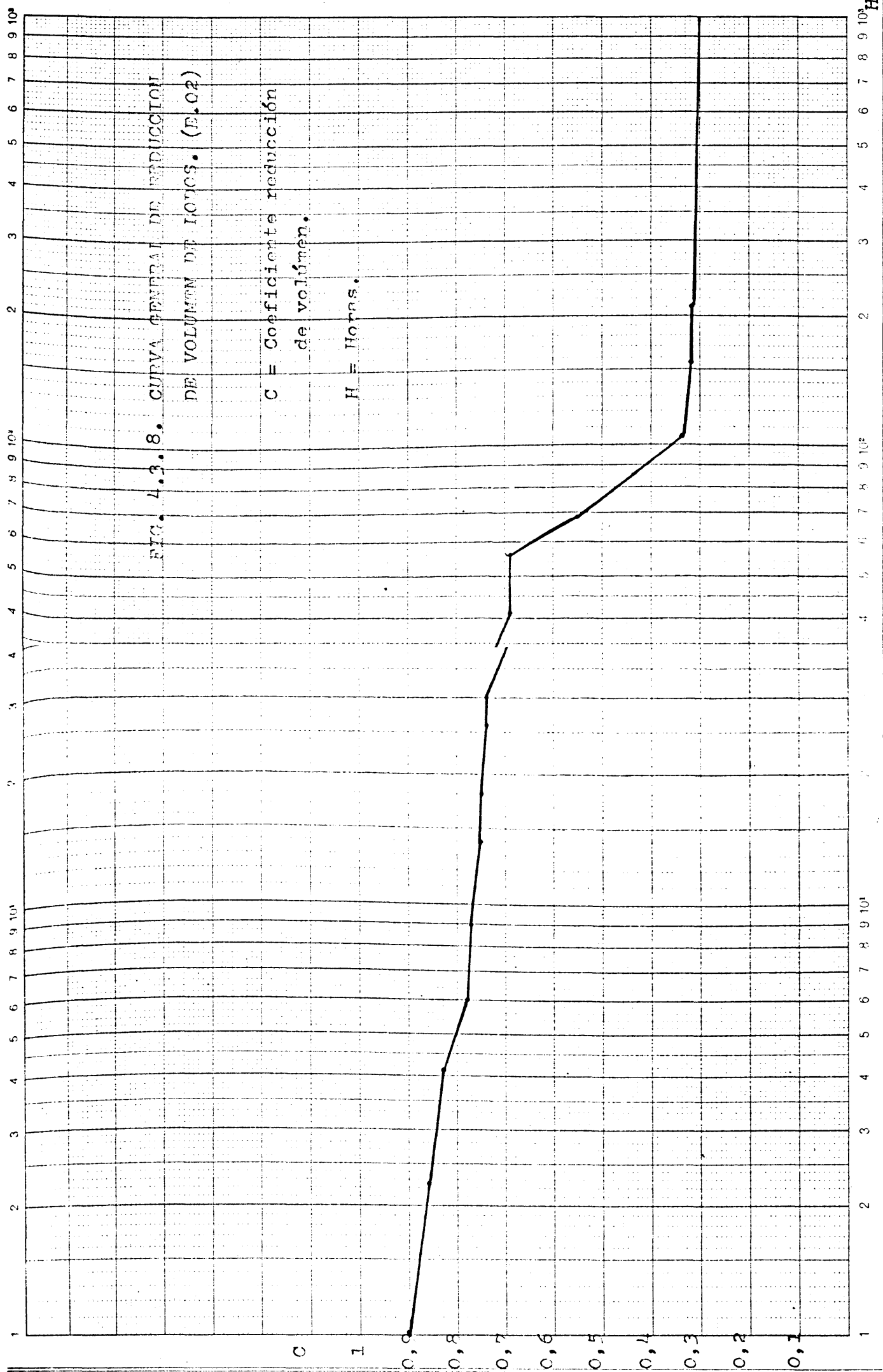
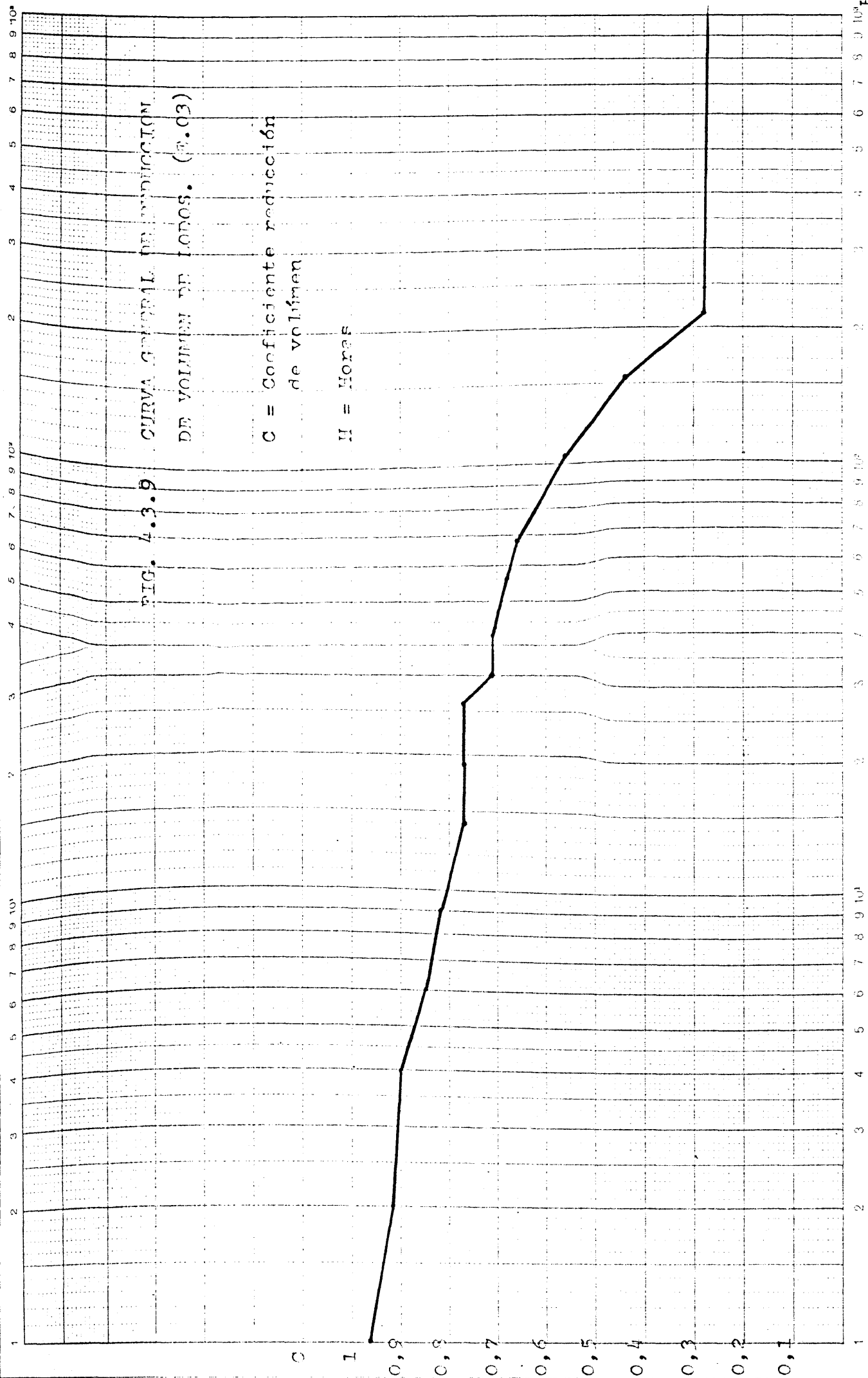
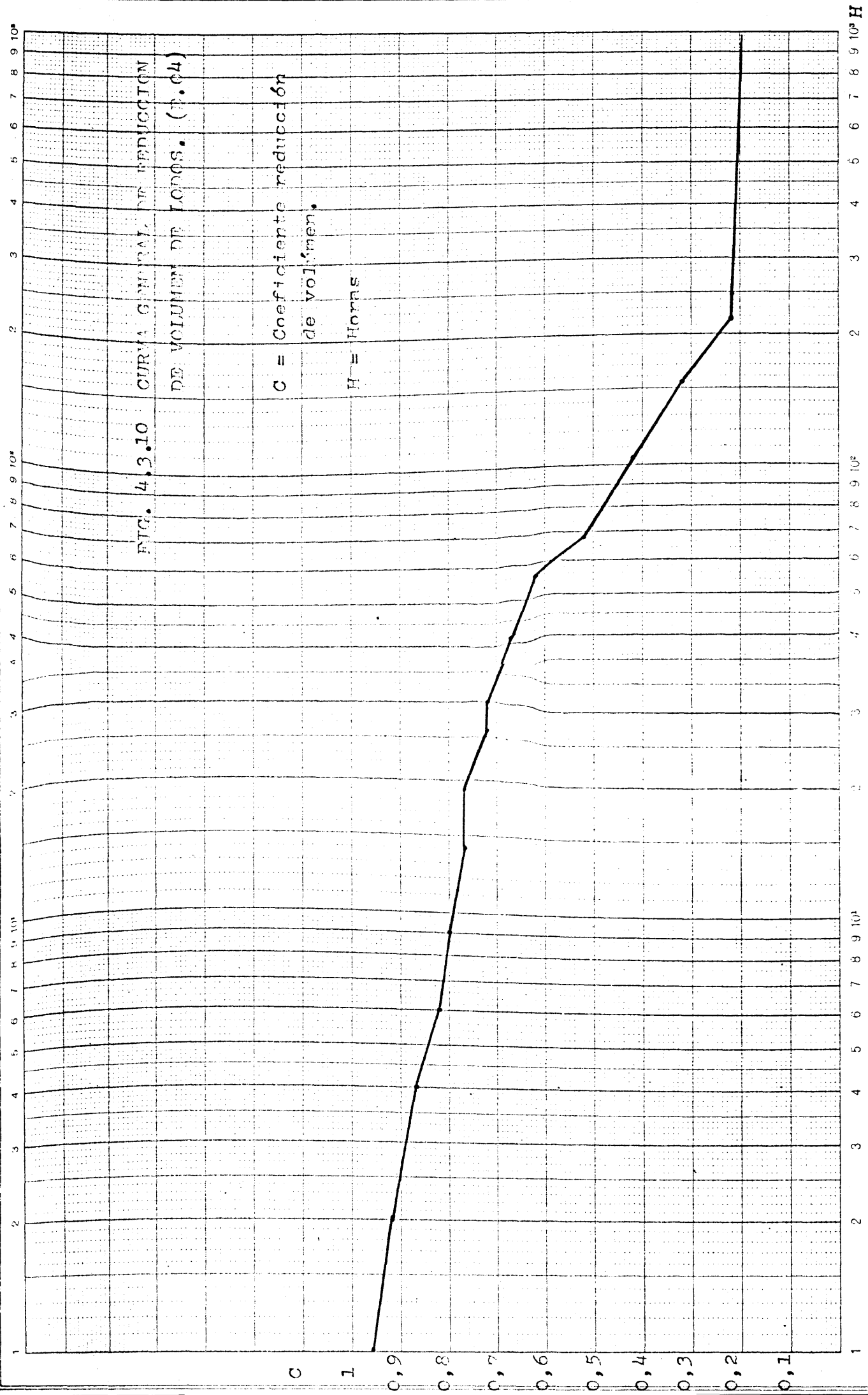


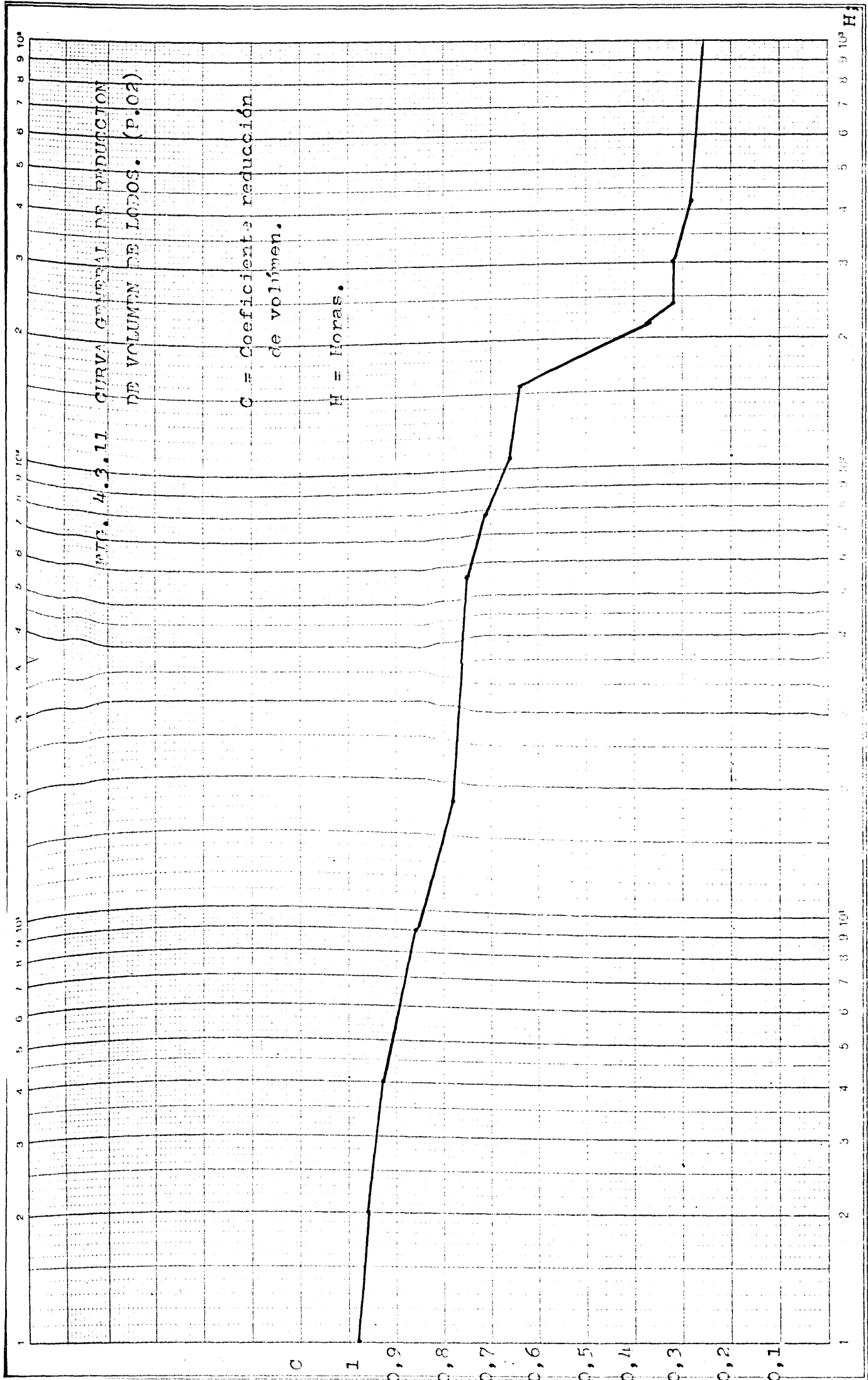
FIG. 4.3.9 CURVA GENERAL DE REDUCCION  
DE VOLUMEN DE LONOS. (T.03)

C = Coeficiente reducción  
de volúmen

H = Horas







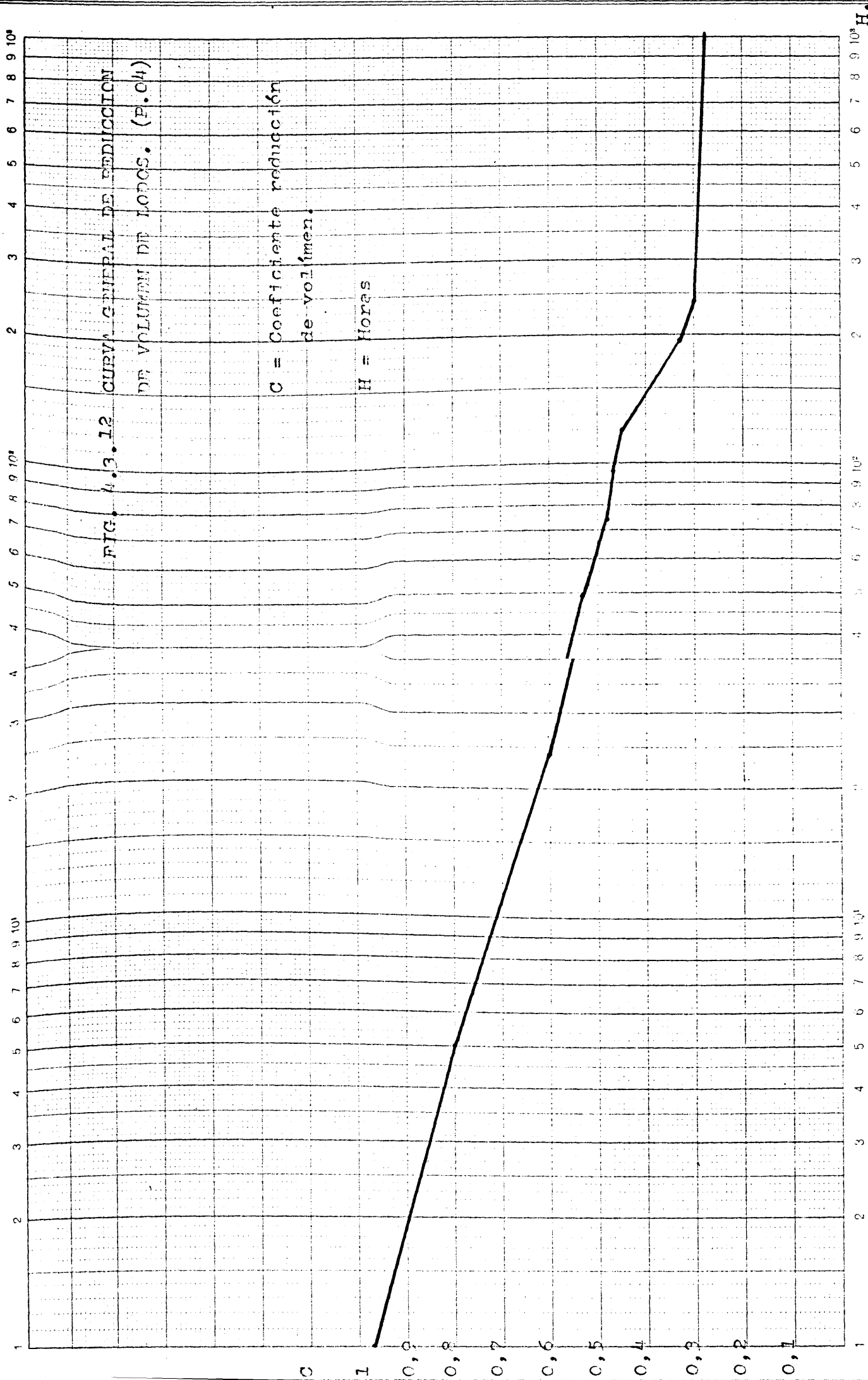


FIG. 4.3.13 CURVA GENERAL DE REDUCCION  
DE VOLUMEN DE IODOS. (P.05)

C = Coeficiente reducción  
de volúmen.

H = Horas.

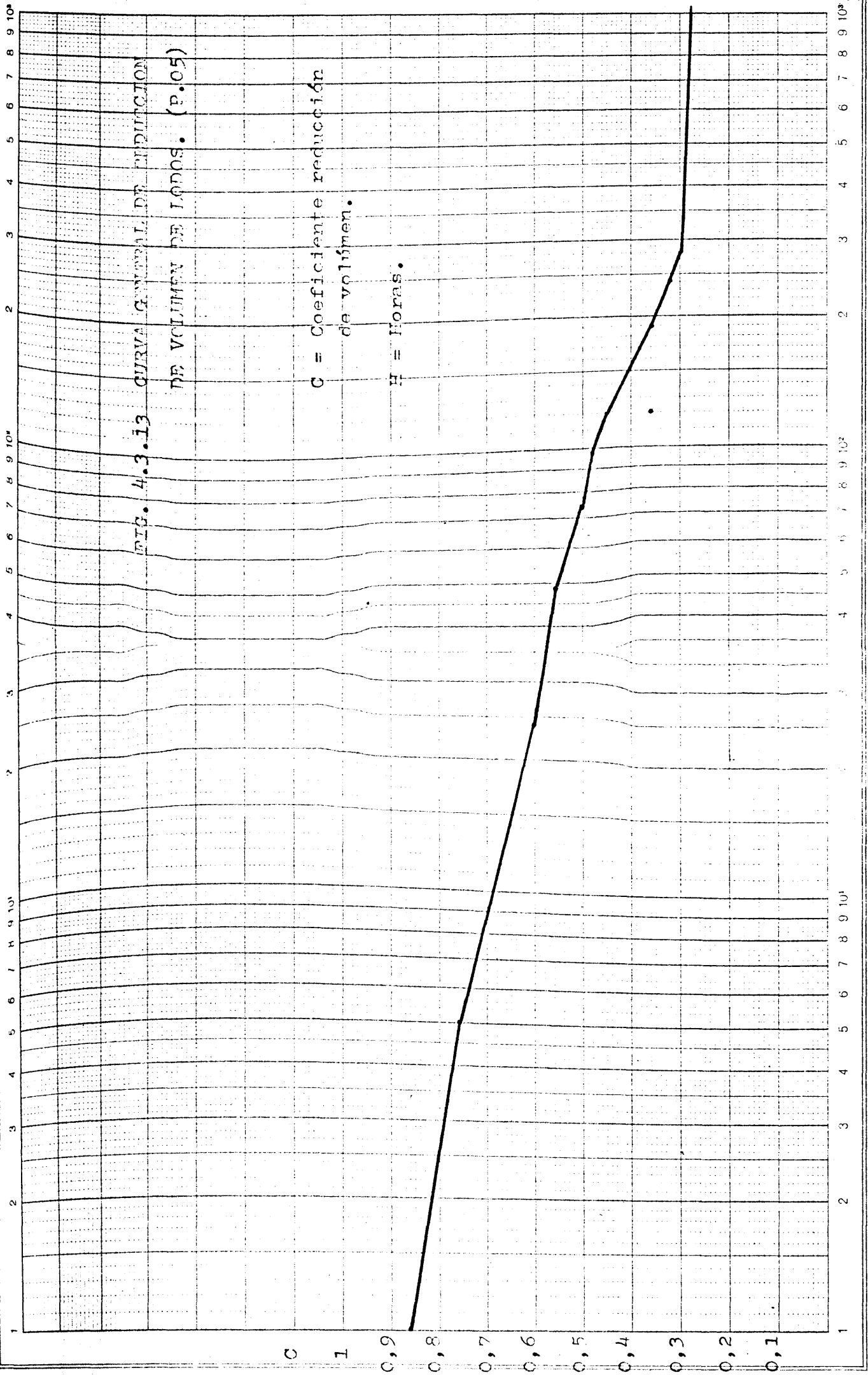
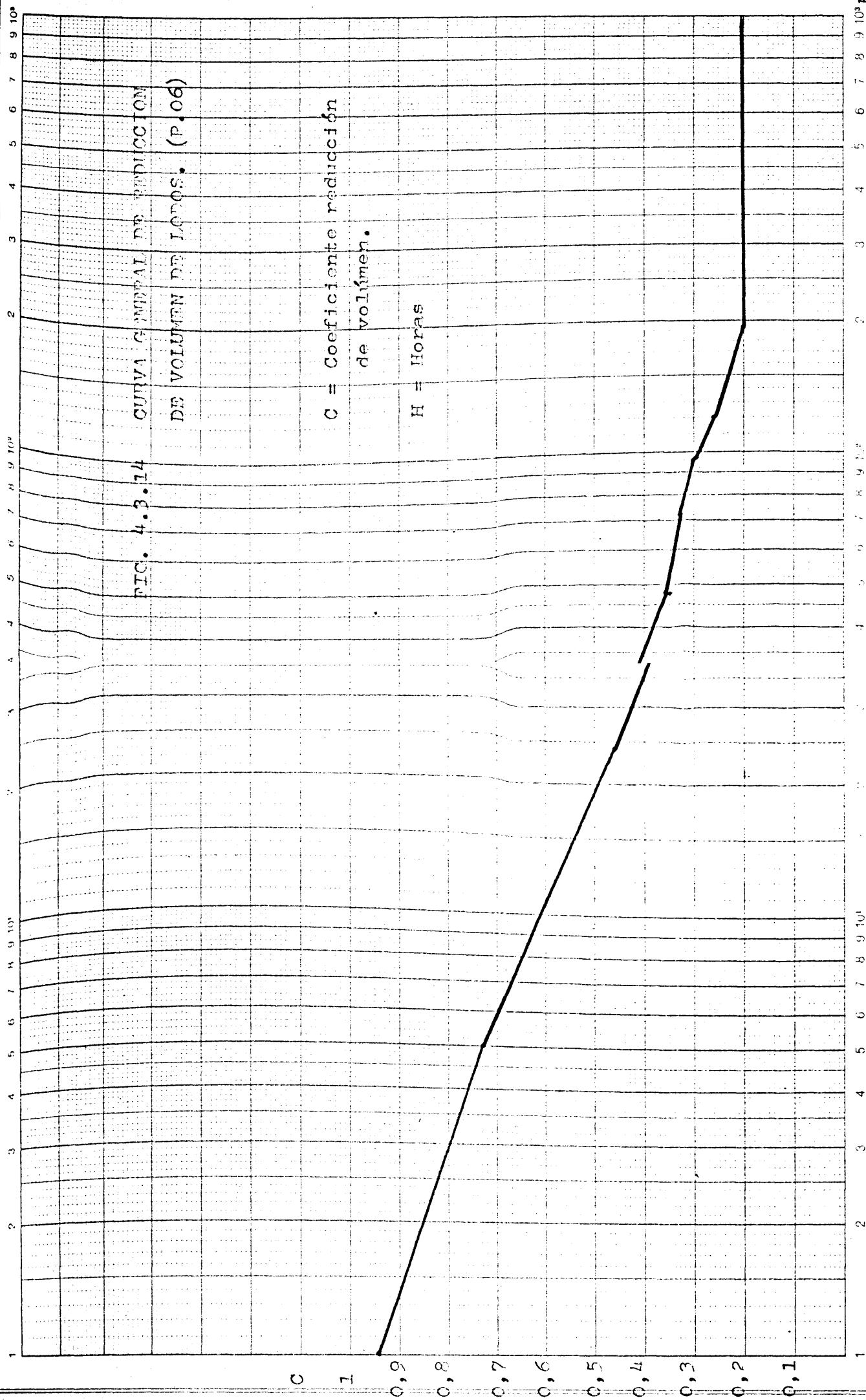




FIG. 4.3.14 CURVA GENERAL DE REDUCCION  
DE VOLUMEN DE Lodos. (P.06)

C = Coeficiente reducción  
de volúmen.

H = Horas



#### 4.3.5. Factores climatológicos.

El proceso de secado es natural. Por tanto - hay que contar que el conocimiento perfecto de la - climatología de el lugar para el que se vaya a proyectar la era será decisivo.

Los factores que influyen por orden de importancia son:

- 1º) Humedad relativa
- 2º) Temperatura
- 3º) Evaporación
- 4º) Precipitación

La humedad reltiva es el factor decisivo, para el secado. No se puede bajar el grado de humedad de un lodo por debajo de su valor.

Si observamos los valores expuestos en el anejo 3, apartado 3.2.3. veremos que para una zona análoga a la de Madrid, si establecemos como límite de humedad - el 60% desde Octubre hasta Abril, no podremos secar lodos si consideramos la humedad media. Teniendo en cuenta que durante el día la humedad decrece, ver mínimas, los meses inhábiles se reducen a los de invierno. Por-lo tanto podemos aceptar como media una temporada de 8 meses hábiles en Madrid.

La temperatura influye en cuanto a un secado por radición solar. Para calcular su influencia apoyándonos en los resultados obtenidos en el laboratorio (anexo 1. apartado 1.2.) considerando las temperaturas máximas y medias obtenemos, que los meses de invierno poco pueden secar, si no es por un efecto combinado con la evaporación por aire seco.

La evaporación es un dato climatológico que por analogía nos puede dar la pérdida de agua total, sin considerar el drenaje. En el anexo 3. apartado 3.2.8. se da la evaporación media en Madrid. Si tomamos los meses de Marzo a Octubre obtenemos una evaporación media de las medias de 8 mm. Por tanto para una altura de lodo de 20 cm. hemos supuesto que 14 cm. se pierden por drenaje. Para una humedad de la torta de 55% debe perder 43,3 mm. por evaporación. Suponiendo una media de 8 mm. día obtenemos 6 días de evaporación. Suponiendo que la evaporación no empieza de una manera efectiva, hasta que termina la filtración y que esta dura cuatro días, tenemos un tiempo de secado de 10 días. Será recomendable suponerle un rendimiento del 80%.

La lluvia debe influir en el secado, pero con una consideración. No se debe eliminar toda por evaporación, si no que la mayoría se drena. Cuando la duración del chubasco es corto aunque sea intenso prácticamente no influye en el secado, ya que todo va al drenaje.

#### 4.3.6. Humedad de los lodos.

El estudio de la humedad de los lodos, lo podemos sintetizar en la figura 4.3.15, donde se incluye una Curva General de Variación de humedad, a lo largo del tiempo, fruto de nuestra experiencia en las Estaciones Depuradoras de Madrid, cuyas mediciones se han reflejado en el anejo 1.

De ella deducimos que en la época en que las condiciones climatológicas son favorables, se produce un grado de humedad que hace que los lodos sean manejables a pala a los catorce días. Por lo tanto suponiendo un factor de incidencia de lluvia que incremente en dos días el ciclo y otros cuatro para la retirada y acondicionamiento de la era, la duración del ciclo es de 20 días. Suponiendo un periodo hábil de 8 meses obtenemos que se pueden repetir el ciclo 12 veces por año.

Este estudio se ha completado con unos seguimientos en estufa y otros en eras experimentales.

De los primeros, los de laboratorio, deducimos que las condiciones que se dan en ellas, de continuidad de factores de ambiente, no se pueden aproximar a la realidad y por tanto no son representativos, solo nos pueden servir para estudiar

FIG. 4.3.15. CURVA GENERAL DE VARIACION  
DE HUMEDAD

humedad %

100  
90  
80  
70  
60  
50  
40  
30  
20  
10

10

20

30

40

50

días.

Fig. 4.3.16. REPRESENTACION DEL ESTUDIO DE  
VARIACION DE HUMEDADES EN LA-

BORATORIO.

—	(E.08)	37°C
—Δ	(E.08)	30°C
—o	(E.08)	20°C
—+	(E.09)	30°C
—□	(E.09)	20°C

humedad

100

90

80

70

60

50

40

30

20

10

10<sup>1</sup>

10<sup>2</sup>

10<sup>3</sup>

10<sup>4</sup>

10<sup>5</sup>

10<sup>6</sup>

10<sup>7</sup>

10<sup>8</sup>

10<sup>9</sup>

10<sup>10</sup>

10<sup>1</sup>

10<sup>2</sup>

10<sup>3</sup>

10<sup>4</sup>

10<sup>5</sup>

10<sup>6</sup>

10<sup>7</sup>

10<sup>8</sup>

10<sup>9</sup>

10<sup>10</sup>

3

4

5

6

7

8

9

10

10<sup>1</sup>

10<sup>2</sup>

10<sup>3</sup>

10<sup>4</sup>

10<sup>5</sup>

10<sup>6</sup>

10<sup>7</sup>

10<sup>8</sup>

10<sup>9</sup>

10<sup>10</sup>

10<sup>11</sup>

10<sup>12</sup>

10<sup>13</sup>

10<sup>14</sup>

10<sup>15</sup>

10<sup>16</sup>

10<sup>17</sup>

10<sup>18</sup>

10<sup>19</sup>

10<sup>20</sup>

10<sup>21</sup>

10<sup>22</sup>

10<sup>23</sup>

10<sup>24</sup>

10<sup>25</sup>

10<sup>26</sup>

10<sup>27</sup>

10<sup>28</sup>

10<sup>29</sup>

10<sup>30</sup>

10<sup>31</sup>

10<sup>32</sup>

10<sup>33</sup>

10<sup>34</sup>

10<sup>35</sup>

10<sup>36</sup>

10<sup>37</sup>

10<sup>38</sup>

10<sup>39</sup>

10<sup>40</sup>

10<sup>41</sup>

10<sup>42</sup>

10<sup>43</sup>

10<sup>44</sup>

10<sup>45</sup>

10<sup>46</sup>

10<sup>47</sup>

10<sup>48</sup>

10<sup>49</sup>

10<sup>50</sup>

10<sup>51</sup>

10<sup>52</sup>

10<sup>53</sup>

10<sup>54</sup>

10<sup>55</sup>

10<sup>56</sup>

10<sup>57</sup>

10<sup>58</sup>

10<sup>59</sup>

10<sup>60</sup>

10<sup>61</sup>

10<sup>62</sup>

10<sup>63</sup>

10<sup>64</sup>

10<sup>65</sup>

10<sup>66</sup>

10<sup>67</sup>

10<sup>68</sup>

10<sup>69</sup>

10<sup>70</sup>

10<sup>71</sup>

10<sup>72</sup>

10<sup>73</sup>

10<sup>74</sup>

10<sup>75</sup>

10<sup>76</sup>

10<sup>77</sup>

10<sup>78</sup>

10<sup>79</sup>

10<sup>80</sup>

10<sup>81</sup>

10<sup>82</sup>

10<sup>83</sup>

10<sup>84</sup>

10<sup>85</sup>

10<sup>86</sup>

10<sup>87</sup>

10<sup>88</sup>

10<sup>89</sup>

10<sup>90</sup>

10<sup>91</sup>

10<sup>92</sup>

10<sup>93</sup>

10<sup>94</sup>

10<sup>95</sup>

10<sup>96</sup>

10<sup>97</sup>

10<sup>98</sup>

10<sup>99</sup>

10<sup>100</sup>

10<sup>101</sup>

10<sup>102</sup>

10<sup>103</sup>

10<sup>104</sup>

10<sup>105</sup>

10<sup>106</sup>

10<sup>107</sup>

10<sup>108</sup>

10<sup>109</sup>

10<sup>110</sup>

10<sup>111</sup>

10<sup>112</sup>

10<sup>113</sup>

10<sup>114</sup>

10<sup>115</sup>

10<sup>116</sup>

10<sup>117</sup>

10<sup>118</sup>

10<sup>119</sup>

10<sup>120</sup>

10<sup>121</sup>

10<sup>122</sup>

10<sup>123</sup>

10<sup>124</sup>

10<sup>125</sup>

10<sup>126</sup>

10<sup>127</sup>

10<sup>128</sup>

10<sup>129</sup>

10<sup>130</sup>

10<sup>131</sup>

10<sup>132</sup>

10<sup>133</sup>

10<sup>134</sup>

10<sup>135</sup>

10<sup>136</sup>

10<sup>137</sup>

10<sup>138</sup>

10<sup>139</sup>

10<sup>140</sup>

10<sup>141</sup>

10<sup>142</sup>

10<sup>143</sup>

10<sup>144</sup>

10<sup>145</sup>

10<sup>146</sup>

10<sup>147</sup>

10<sup>148</sup>

10<sup>149</sup>

10<sup>150</sup>

10<sup>151</sup>

10<sup>152</sup>

10<sup>153</sup>

10<sup>154</sup>

10<sup>155</sup>

10<sup>156</sup>

10<sup>157</sup>

10<sup>158</sup>

10<sup>159</sup>

10<sup>160</sup>

10<sup>161</sup>

10<sup>162</sup>

10<sup>163</sup>

10<sup>164</sup>

10<sup>165</sup>

10<sup>166</sup>

10<sup>167</sup>

10<sup>168</sup>

10<sup>169</sup>

10<sup>170</sup>

10<sup>171</sup>

10<sup>172</sup>

10<sup>173</sup>

10<sup>174</sup>

10<sup>175</sup>

10<sup>176</sup>

10<sup>177</sup>

10<sup>178</sup>

10<sup>179</sup>

10<sup>180</sup>

10<sup>181</sup>

10<sup>182</sup>

10<sup>183</sup>

10<sup>184</sup>

10<sup>185</sup>

10<sup>186</sup>

10<sup>187</sup>

10<sup>188</sup>

10<sup>189</sup>

10<sup>190</sup>

10<sup>191</sup>

10<sup>192</sup>

10<sup>193</sup>

10<sup>194</sup>

10<sup>195</sup>

10<sup>196</sup>

10<sup>197</sup>

10<sup>198</sup>

10<sup>199</sup>

10<sup>200</sup>

10<sup>201</sup>

10<sup>202</sup>

10<sup>203</sup>

10<sup>204</sup>

10<sup>205</sup>

10<sup>206</sup>

10<sup>207</sup>

10<sup>208</sup>

10<sup>209</sup>

10<sup>210</sup>

10<sup>211</sup>

10<sup>212</sup>

10<sup>213</sup>

10<sup>214</sup>

10<sup>215</sup>

10<sup>216</sup>

10<sup>217</sup>

10<sup>218</sup>

10<sup>219</sup>

10<sup>220</sup>

10<sup>221</sup>

10<sup>222</sup>

10<sup>223</sup>

10<sup>224</sup>

efectos de radiación ya que no se produce una ventilación. Estos datos se recogen en figura 4.3.15 y en el anejo. 1.

El ensayo con eras experimentales, nos confirma la gran influencia del secado por aire.

En la figura 4.3.17 se representa el ensayo E.04. con paredes muy bajas donde se puede desarrollar el secado por aire. En la figura 4.3.18 vemos la altura de las paredes del cilindro que impiden la entrada del aire.

A los catorce días la E.04 tenía una humedad del 54% y la E.01 del 75%. Es decir, que necesitaría otros diez días más de secado.

En las figuras 4.3.20 y 4.3.19 se muestra el aspecto de unas eras con el lodo seco y un detalle comparativo de una torta con un 37% de humedad.





Fig. 4.3.17 Ensayo E.04.

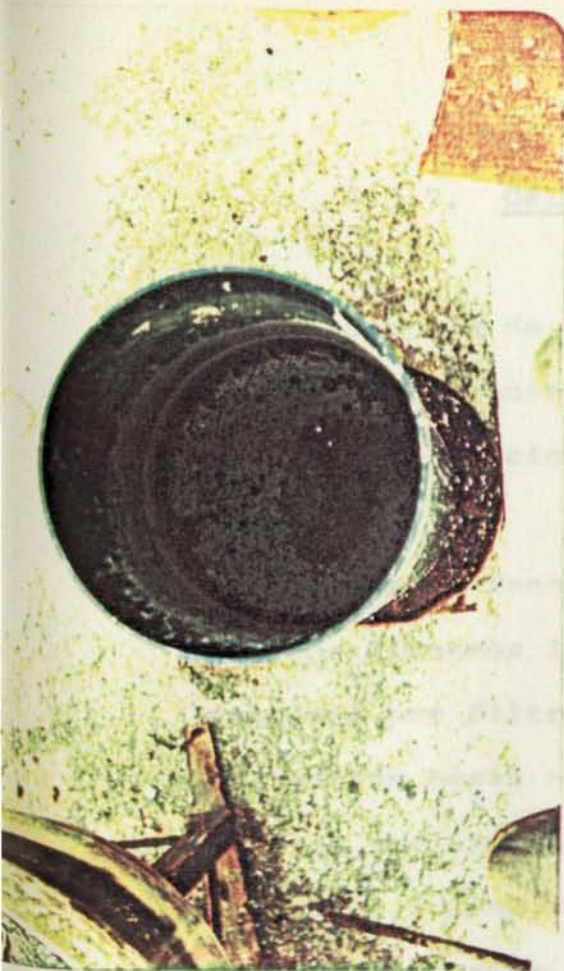


Fig. 4.3.18 Ensayo E.01

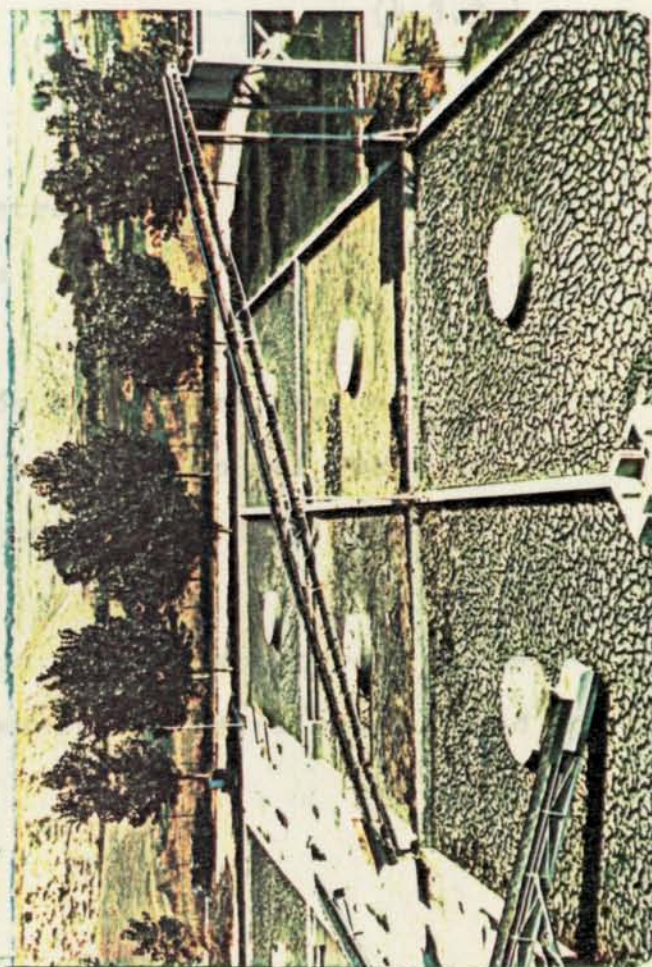


Fig. 4.3.19 Aspecto general de eras secas

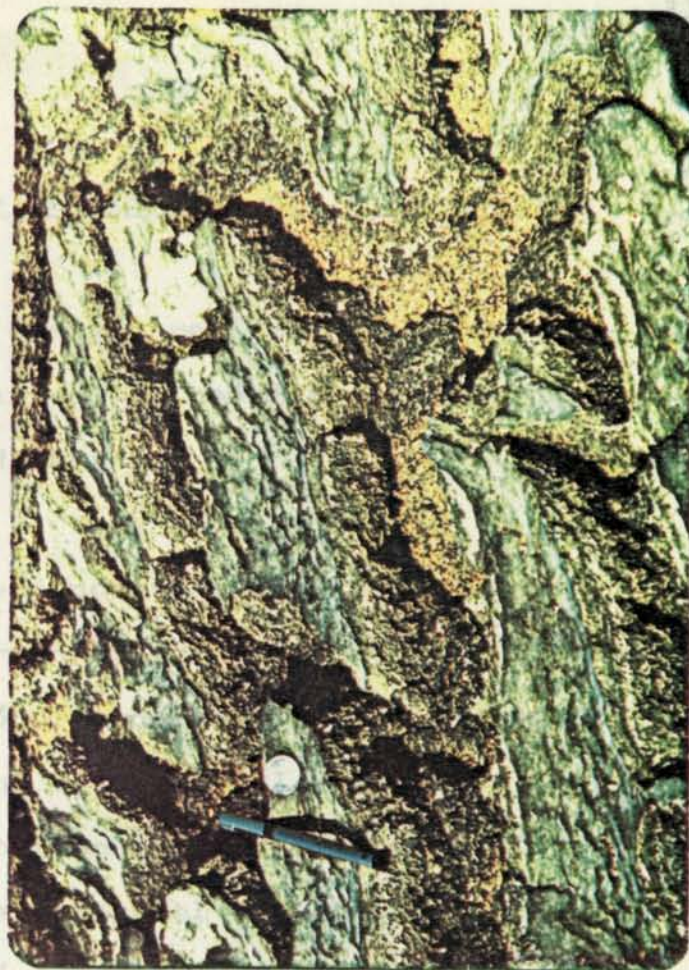


Fig. 4.3.20 Lodo seco.



#### 4.3.7. Cálculo teórico del ciclo de secado

Después de los ensayos realizados, podemos intentar el proponer una formula teórica, que nos de la duración de un ciclo de secado.

Sea un fango de concentración C en %. Supongamos que llenamos la era hasta una altura h. El 70% se evacuará por filtración. Suponiendo que no empieza la filtración hasta que ha terminado el drenaje, de los ensayos realizados, obtenemos una velocidad de filtración de 1,2 l/m<sup>2</sup>. hora. Luego el tiempo que tardara en drenar en dias será:

$$t = \frac{h \cdot 0,7}{24 \cdot 1,2} \quad (4.3.3.)$$

Siendo: h milímetros

t = dias

Si la evaporación de la zona, es de e un m/dia el tiempo de secado por evaporación del resto del agua será para llegar a una humedad del 55%.

La altura de agua que se debe perder por evaporación será la que resuelve de fijar una humedad final de la torta.

Sea esta humedad de

$$m = 0,3 h - ch - \frac{d.c.h.}{1-d} =$$

$$= h \left[ 0,3 - c - \frac{d c}{1-d} \right] \quad (4.3.4.)$$

El tiempo en días necesario para realizar es ta evaporación, será  $m$  dividido por  $c$ , y multiplicado por 1.2. ya que el fenómeno, no tiene el mínimo rendi miento.

Por tanto la fórmula general será:

$$t = \frac{0,7 h.}{24 \cdot 1,2} + \frac{1,2 h.}{e} \cdot \left( 0,3 - c - \frac{d.c}{1-d} \right) \quad (4.3.5.)$$

donde:

$t$  = tiempo de duración del ciclo de secado en días

$h$  = altura de lodos en mm.

$e$  = evaporación media diaria de la zona en mm.

$c$  = concentración del lodo en tanto por uno

$d$  = humedad final del lodo en tanto por uno.

Aplicación al caso de Madrid:

$$h = 200 \text{ mm.}$$

$$e = 8 \text{ mm./dia}$$

$$c = 0,04$$

$$d = 0,55$$

$$h = \frac{0,7 \cdot 200}{24 \cdot 1,2} + \frac{1,2 \cdot 200}{8} (0,3 - 0,04 - \frac{0,04 \cdot 0,55}{1 - 0,55}) = 11,19 \text{ dias.}$$

Esta cantidad habrá que incrementarla en los días necesarios para la retirada y el incremento que pueda tener por influencia de la lluvia.

Siguiendo con el mismo caso vamos a suponer, que necesitamos cuatro días para vaciar y acondicionar y que lo incrementamos en dos días por influencia de lluvia. Total de ciclo de secado 18 días. Como hemos supuesto 8 meses hábiles obtenemos que la podemos llenar 13 veces.

Luego suponiendo una altura de 20 cm. de lodo la altura anual será de 2,60 m., es decir 2.600 l. Como suponemos que el lodo producido por habitante es de 182,5 l/año obtenemos una superficie necesaria de un metro cuadrado por cada 14 habitantes, en el caso de depuración biológica por fangos activos y digestión.

Si consideramos la depuración por oxidación total, sería necesario un metro cuadrado por cada 29 habitantes.

## 5.- CONCLUSIONES

=====

## 5. CONCLUSIONES

Las eras de secado continúan siendo, un sistema válido de deshidratación de lodo sobretodo, para -  
pequeñas poblaciones. (Menores de 20.000 habitantes)

El volumen de lodos a secar es un dato que -  
viene fijado por el sistema de depuración que se elija. Como cifras medias se pueden tomar 180 litros/habitante y por año en depuración por fangos activos y digestión y 85 litros por habitante y año por el sistema de oxidación total.

La aportación original al tema ha sido:

- Determinar que las dimensiones de las eras -  
solo tienen la limitación de la operatividad -  
se ha fijado un módulo aceptable de 60 m<sup>2</sup>.
- Fijar como talla efectiva de la arena la comprendida entre 0,2 y 0,4 mm. y un coeficiente de uniformidad menor de 4.
- Fijar como límite de talla efectiva 0,8 mm. -  
y coeficiente de uniformidad 2 por encima de -  
los cuales la retención de sólidos es inaceptable.

- Determinar que la velocidad de filtración es de 1 l/m<sup>2</sup>. hora, excepto las 8 primeras horas que es de unos 4 l/m<sup>2</sup>. hora.
- Se ha establecido que se efectua una reducción de volúmen de lodos del 75%. Se han obtenido las leyes que fijan esta reducción:

De 1 a 48 horas:  $c = 0,93 - 0,15 \log.h.$

De 48 a 270 " :  $c = 1,71 - 0,61 \log.h.$

En donde h = tiempo en horas de duración del

En donde h = tiempo en horas de duración del  
secado.

c = coeficiente de reducción de volúmen.

- Se ha relacionado el secado de sólidos, en procesos industriales al secado de lodos en<sup>-</sup>eras.
- Se ha dado capital importancia a la humedad-relativa del aire ambiente, dado que no se puede conseguir humedades por secado inferiores a él. También se ha relacionado la evaporación media del ambiente con el secado.

- Se ha llegado de una forma experimental ha establecer 12 ciclos de secado por año, para la zona de Madrid.
- Se ha obrenido una fórmula teórica que nos da - el tiempo de secado

$$t = \frac{0,7 \text{ h.}}{24} + \frac{1,2 \text{ h.}}{e} \left( 0,3 - c - \frac{d \cdot c}{1-d} \right)$$

t = tiempo de duración del ciclo de secado en dias

h = altura de lodos en mm.

e = evaporación media de la zona en dias.

c = concentración de lodos en tanto por uno.

d = humedad final en tanto por uno.

De la aplicación de estas conclusiones, se ha obtenido que para la zona de Madrid, sería necesario un - metro cuadrado de era por cada 14 habitantes en un tratamiento de fangos activos y 29 para una oxidación total.



## 6.- BIBLIOGRAFIA

=====

## BIBLIOGRAFIA

=====

- BRAUN, R. "Le problème des boues d'épuration"  
Trente (Italie) Mai, 1.965
- BROUZES, PAUL "Précis d'épuration biologique"  
París, 1.973
- BROWN, GEORGE G. "Operaciones básicas de la Ingeniería  
Química" - Barcelona 1.955
- CASSELL, E. ALAN "Solidification of Sludges With portland  
cement. - February 1.970
- COMPAIN, C.P. "Rejet des boues en mer: Technique et  
économie" Janvier, 1.973
- DEGREMONT, GILBERT "Manual Técnico del Agua" - 1.973
- DEPARTAMENTO DE SA "Manual de Tratamiento de Aguas Negras"  
NIDAD DEL ESTADO - México, 1.964  
DE NUEVA YORK.
- FAIR, GORDON R. "Purificación de aguas y tratamiento y  
remoción de aguas residuales" México 1.971
- FAIR, GORDON M. "Abastecimiento de aguas y remoción de  
aguas residuales. - México 1.968

- HARPER, MARTIN E. "Drying of sand - digested Sludge mixtures" - april, 1.970
- HERNANDEZ MUÑOZ AURELIO (Revista de Obras Públicas) "Avances y Tendencias de la Depuración de - Aguas Residuales." Madrid, Julio 1.976
- IMHOFF "Manual de Saneamiento de Poblaciones" Madrid, 1.969
- LAZARO URRÁ, JUAN "Hidrología Urbanística" Madrid, 1.955
- McBAIN, JAMES W. "Ciencia de los Coloides" Barcelona, 1.956
- PAZ CASAÑE JOSE M<sup>a</sup> )  
PAZ MAROTO, JOSE M<sup>a</sup> ) "Saneamiento Ambiental" Madrid, 1.968
- PAZ CASAÑE JOSE M<sup>a</sup>  
PAZ MAROTO, JOSE M<sup>a</sup> "Abastecimiento y Depuración de Aguas Potable" - Madrid, 1.969
- THOMPSON, L.H. "Mechanised Sludge Drying bed" January, 1.966
- VERHELST, D. "Epuration des eaux résiduaires des - industries alimentaires. Traitement-desboues résiduelles". Novembre 1.974
- VESILIND, P. AARNE "Treatment and disposal of Wastewater Sludges" - Michigan, 1.974

7.- A N E J O S

=====

A N E J O   N º   1

ENSAYOS Y CALCULOS DE LABORATORIO  
=====

## 1.1 INTRODUCCION

=====

Se ha recopilado en este anejo, todos los datos, - métodos y ensayos que sirven de base para las conclusiones expuestas en la tesis. No se pretende hacer una recopilación de los métodos de ensayo de laboratorio si - no, dados por conocidos estos, reflejar las particularidades de cada caso y dejar constancia de los resultados intermedios obtenidos para que sirvan de comprobación - de la fiabilidad de las conclusiones y también para que se puedan sacar conclusiones que quizá no sean útiles - para este trabajo.

## 1.2 ENSAYO DE SECADO EN LABORATORIO (E.8.76)

===== LABORATORIO (E.8.76) =====

Consiste el ensayo en la determinación de pérdida de humedad de un lodo, de la Estacion Depuradora de El-Pardo (Madrid) compuesto por fangos primarios y biológicos digeridos anaerobicamente.

Se utilizaron tres estufas que se mantenian, a - tres temperaturas medias, de 20, 30 y 37°C, introduciéndose una muestra duplicada en cada una de ellas.

Para determinar la pérdida de agua se utiliza, - papel de filtro, un embudo BUMSEN y un ERLLENMEYER de - forma que se pueda recoger el filtrado.

## CONCENTRACION DE LODOS:

=====

70 ml. de Fango pesan 3,7450 - papel 2,6902

70 ml. de Fango pesan 3,7634 - papel 2,6676

## Tomando la medida

70 ml. .... 2,6789

100 ml. .... 3,827 g% = 38,27 g/l.

Peso de la masa lodo y agua = 103,1373 g/100 ml

## Fundamento de pesada:

Ante la imposibilidad de obtener, una balanza que pesando, más de 400 g (que es lo que pesa un embudo BUMSEN corriente, más un ERLLENMEYER de 250 ml. - como soporte) puede obtener una precisión, mínima de decimas de gramo, el sistema que usaré para la determinación de la humedad de la pasta sera:

- 1º.- Hacer la filtración en el embudo.
- 2º.- Para efectuar la pesada se extraerá la - pasta, formada con el papel de filtro previamente colocado en el embudo.
- 3º.- Qudando todo el papel impregnado de lodo- y no pudiendo diferenciarlo, se numerará-

Referenc.	Peso del papel.-	Volúmen de lodo	Temperatura media OC	Volúmen de filtrado - en 30 mint.
1	0,9522	100 ml.	20	19 ml.
2	0,9422	100 ml.	20	29 ml.
3	1,0122	100 ml.	30	29 ml.
4	1,0430	100 ml.	30	28 ml.
5	1,0635	100 ml.	37	22 ml.
6	0,8951	100 ml.	37	28 ml.

Papel utilizado para la filtración Albet nº 238



## PESADAS Y RESULTADOS

=====

Referencia	Peso muestra y papel (gr.)	Peso muestra (gr.)	Humedad %
------------	-------------------------------	-----------------------	--------------

---

PRIMERA PESADA A LAS 14 HORAS DE  
HABER INICIADO EL EXPERIMENTO.-

---

1	33,7641.	32,8119	88,33
2	33,2114	32,2692	88,1
3	32,4050	31,3928	87,8
4	33,4051	32,3621	88,1
5	10,2979	9,2344	58,5
6	5,9092	5,0141	23,6

## SEGUNDA PESADA A LAS 23 HORAS

1	30,7320	29,7798	87,1
2	30,3977	29,4555	87,
3	28,4105	27,3983	86
4	29,4611	28,4181	86,5
5	5,0942	4,0307	5,0
6	4,8139	3,9188	2,3

## TERCERA PESADA A LAS 39 HORAS

1	27,8000	26,8478	85,7
2	28,2535	27,3113	85,9
3	21,1235	20,1113	80,9
4	23,5493	22,5063	82,99

## CUARTA PESADA A LAS 90 HORAS

1	22,4713	21,5191	82,2
2	23,4900	22,5478	83,0
3	15,8588	14,8466	74,2
4	18,8818	17,8388	78,5

## QUINTA PESADA A LAS 96 HORAS

1	20,5708	19,6186	80,5
2	22,0825	21,1403	81,9
3	14,7001	13,6879	72,0
4	17,6283	16,5853	73,9

## SEXTA PESADA A LAS 112 HORAS

1	16,7665	15,8143	75,8
2	19,4634	18,5212	79,3
3	12,9658	11,9536	67,9
4	15,5347	14,4917	73,6

OBSERVACION: En este intervalo del secado en los ensayos 3 y 4

## SEPTIMA PESADA A LAS 137 HORAS

1	15,6717	14,7195	74
2	18,5543	17,6121	78
3	7,5339	6,5217	41,3
4	9,8077	8,7647	56,3

## OCTAVA PESADA A LAS 160 HORAS

1	10,7109	9,7587	60,8
2	13,2531	12,3109	68,9
3	5,1183	4,1061	6,8
4	6,1713	5,1078	25

## NOVENA PESADA A LAS 185 HORAS

1	9,3817	8,4295	54,6
2	11,7817	10,8395	64,7
3	4,9796	3,9674	3,5
4	4,9917	3,9487	3,0

## DECIMA PESADA A LAS 208 HORAS

1	6,7709	5,8187	34,2
2	8,9624	8,0202	52,2

(E.09.76)

Ensayo análogo al anterior en cuanto a temperaturas.

Los lodos se tomaron a las 100 horas de secado en una era experimental. La altura de lodos era al iniciar el ensayo de 20 cm. y cuando se tomo de 4,5 cm.

En este ensayo, la Rf. 1. corresponde a colocar el lodo envuelto en un papel de filtro y los demas sobre un plástico.

Peso de los plásticos:

Referencia	- 1	1,1928 + 5,0344 = 6,2272 gms.
"	- 2	1,1909 gms.
"	- 3	1,1945 gms.
"	- 4	1,1734 gms.

Temperatura de los ensayos:

Rf. 1 y Rf. 2 estuvo sometido a una temperatura - media de 20° C. y la Ref. 3 y Ref. 4 a 30° C.

# PESADAS Y RESULTADOS

Referencia	Peso muestra - y soporte (gr.	Peso muestra gr.	Humedad %
------------	----------------------------------	---------------------	--------------

## Primera pesada a las 0 horas

N - 1	143,1286	136,9014	85,39
N - 2	147,2531	146,0621	75,27
N - 3	117,2310	116,0365	83,83
N - 4	132,8723	131,6939	83,51

## Segunda pesada

N - 1	139,5454	133,3182	85,00
N - 2	144,2564	143,0655	74,75
N - 3	104,6087	103,4142	81,85
N - 4	120,8055	119,6321	81,85

## Tercera pesada a las 38,5 horas

N - 1	134,7481	128,5209	84,84
N - 2	140,9716	139,7807	74,16
N - 3	83,8531	82,6586	77,30
N - 4	106,3566	105,1832	79,36

## Cuarta pesada a las 63 horas

N - 1	116,8483	110,6211	81,92
N - 2	125,7418	124,5509	70,95
N - 3	66,4466	65,2521	71,72
N - 4	88,0308	86,8574	75,00

## Quinta pesada a las 122 horas

N - 1	112,2514	106,0242	81,14
N - 2	121,8584	120,6675	70,06
N - 3	46,7419	45,5474	58,81
N - 4	64,9044	63,7310	65,93

## Sexta pesada a las 135 horas

N - 1	107,5505	101,3233	80,27
N - 2	119,3880	118,1971	69,44
N - 3	35,6843	34,4898	45,60
N - 4	51,4069	50,2335	56,78

## Septima pesada a las 164 horas

N - 1	101,3926	95,1654	78,99
N - 2	107,6418	106,4473	66,06

## Octava pesada a las 180 horas

N - 1	87,2349	81,0077	75,32
N - 2	99,6312	98,4403	63,30

## Novena y ultima pesada desecación total a 100° C

N - 1	26,2176	19,9904
N - 2	37,3090	36,1181
N - 3	19,9540	18,7595
N - 4	22,8831	21,7097

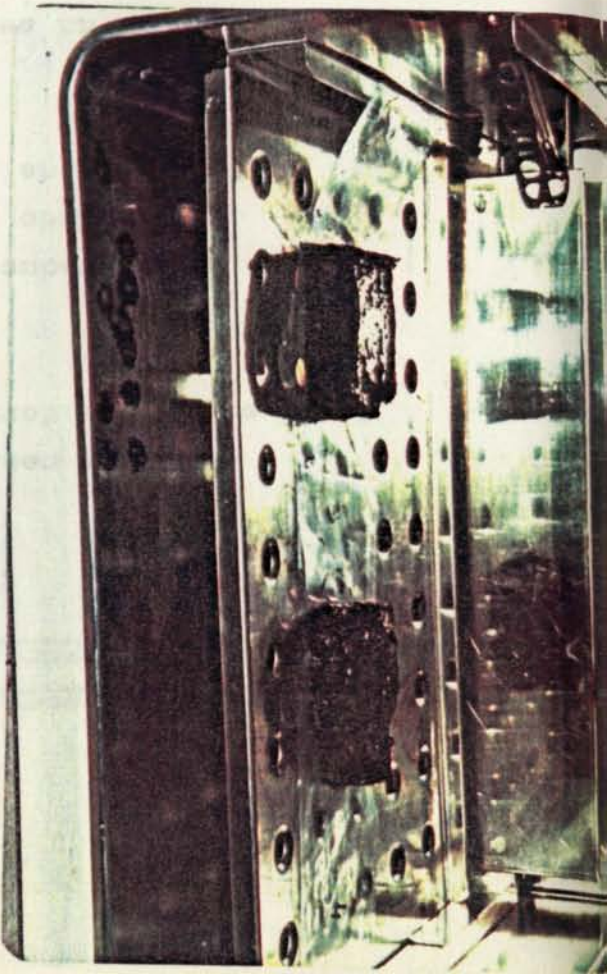
A continuación se incluyen fotografías relativas a estos ensayos donde se aprecia el método seguido.



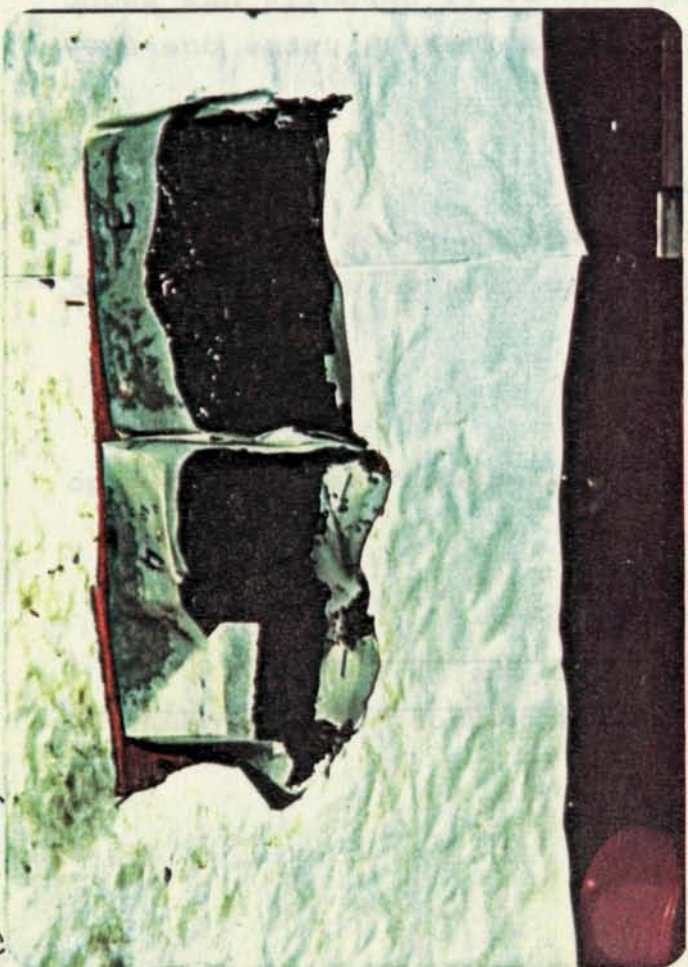
Ensayo de secado en laboratorio E.08.76



Torta de lodo sobre plástico (E.09.76)



Estufa de secado



Torta de lodo sobre papel filtro (C.09.76)



1.3. Ensayo de seguimiento de reducción de volúmen de los lodos vertidos a una era de secado.

Para realizar este ensayo, se ha procedido de la siguiente forma:

- a) La reducción de volúmen se ha medido determinando las alturas de lodos, sobre las -  
eras de secado.
- b) Se ha seguido la evolución, hasta que se -  
ha constatado que no se producía una reduc-  
ción de volúmen apreciable.

Se han medido alturas en cuatro eras, de la Estación Depuradora de El Pardo (Madrid) y en cuatro-maquétas de era reducidas de las siguientes caracte-  
rísticas:

- E.01 Cilindro de plástico opaco de 30 cm. de -  
diámetro y 1 metro de profundidad.  
El filtro de arena corresponde a la granu-  
lometría de referencia M.A.01.01 correspon-  
diente a una arena del arenero de la Esta-  
ción Depuradora de Manoteras. En el anejo-  
2 se estudia su granulometría.

- E.02. Cilindro de plástico de las características dimensiones que el anterior. La granulometría del filtro corresponde a una arena (Rf. CH.20.01) estudiada en el anejo 2, de uso industrial para cho-rreo.
- E.03. Cilindro de plástico transparente de 40 cm. de altura y una superficie de 0,372 m<sup>2</sup>.  
El filtro corresponde a una arena usada en aguas potables, para filtros rápidos. Se ha estudiado su granulometría en el anejo 2 (Rf. FP. 01.01)
- E.04. Cilindro de plástico transparente de 40-cm. de altura y 0,78 m<sup>2</sup>. de base. La arena usada corresponde a una de río lavada y de granulometría estudiada en el anejo 2 con la referencia (FP. 01.01)

Hay que hacer notar que los ensayos E.01 y E.02 introducen un efecto destacable. Al ser de po-co diámetro y mucha altura reducen el efecto de secado por aire y por tanto se reduce a una filtración - y una evaporación producida por el aporte de energía calorífica solar.

A continuación se adjuntan las tablas en que se da:

1º) Perdida de altura en centímetros.

2º) Coeficiente de volúmen reducido. Es decir la relación del volúmen a un tiempo dado respecto al volúmen inicial.

Referencia E. 01

Altura de lodos inicial (a) 21 cm.

HORAS	6. ALTURA DE LODOS EN (CM.)	$\frac{b}{a}$ GRADO DE REDUC
		CION.-
0,00	21	1,0
0,25	20	0,95
2,25	18,5	0,88
4,25	17,5	0,83
6	17	0,81
9	17	0,81
14	16,9	0,80
18	16,8	0,80
26	16	0,76
30	15	0,71
42	14	0,67
56	13,5	0,64
68	12	0,57
104	7,5	0,36
152	7	0,33
217	6,5	0,31
240	6,5	0,31

Referencia E. 02

Altura de lodos inicial (a) 19,4 cm.

HORAS	6. ALTURA DE LODOS EN (cm.)	$\frac{b}{a}$ GRADO DE REDUC
		CION.-
0	19,4	1,0
0,25	18,4	0,25
2,25	16,9	0,87
4,25	16,1	0,83
6	15,2	0,78
9	14,9	0,77
14	14,6	0,75
18	14,6	0,75
26	14,4	0,74
30	14,4	0,74
42	13,4	0,69
56	13,4	0,69
68	10,4	0,54
152	6,4	0,73
217	6,2	0,32
240	6,2	0,32

Referencia E. 03

Altura de lodos inicial (a) 19,5 cm.

HORAS	6. ALTURA DE LODOS EN (cm.)	$\frac{b}{a}$ GRADO DE REDUC CION.-
0	19,5	1,00
2	18	0,92
4	17,5	0,90
6	16,5	0,85
9	16	0,82
14	15	0,77
18	15	0,77
18	15	0,77
26	15	0,77
30	14	0,71
42	14	0,71
56	13,2	0,68
68	12,7	0,66
104	11	0,56
152	8,5	0,44
217	5,5	0,28
240	5,5	0,28

Referencia E. 04

Altura de lodos inicial (a) 20 cm.

HORAS	6. ALTURA DE LODOS EN (cm.)	$\frac{b}{a}$
		GRADO DE REDUC CION.-
0	20	1,00
2	18,5	0,92
4	17,5	0,87
6	16,5	0,82
9	16	0,80
14	15,5	0,77
18	15,5	0,77
26	14,5	0,72
30	14,5	0,72
42	13,5	0,67
56	12,5	0,62
68	10,5	0,52
104	8,5	0,42
152	6,5	0,32
217	4,5	0,22
240	4,5	0,22

Referencia P. 02

Altura de lodos inicial (a) 39 cm.

 $\frac{b}{a}$ 

## 6. ALTURA DE LODOS

GRADO DE REDUC

EN (cm.)

CION.-

HORAS

---

0	39	1,00
2	37,5	0,96
4	36,5	0,93
9	33,6	0,86
18	30,6	0,78
56	29,5	0,75
68	28	0,71
104	26	0,66
152	25	0,64
217	14,5	0,37
240	12,5	0,32
300	12,5	0,32
408	11,0	0,28

NOTA: Llovió dos días



Referencia P. 04

Altura de lodos inicial (a) 30 cm.

 $\frac{b}{a}$ 

6. ALTURA DE LODOS

GRADO DE REDUC

HORAS

EN (cm.)

CION.-

---

0	30	1,00
1,25	29	0,96
5	29,24	0,80
24	18	0,60
48	16	0,53
72	14,5	0,48
96	14	0,47
120	13,5	0,45
192	10	0,33
240	9	0,3

Referencia P.05

Altura de lodos inicial (a) 25 cm.

 $\frac{b}{a}$ 

6. ALTURA DE LODOS

GRADO DE REDUC

HORAS

EN (cm.)

CION.-

---

0	25	1,00
1,25	24	0,96
5	19	0,76
24	15	0,60
48	14	0,56
72	12,5	0,50
96	12	0,48
120	11,5	0,46
192	9	0,36
240	8	0,32

Referencia P. 06

Altura de lodos inicial (a) 15 cm.

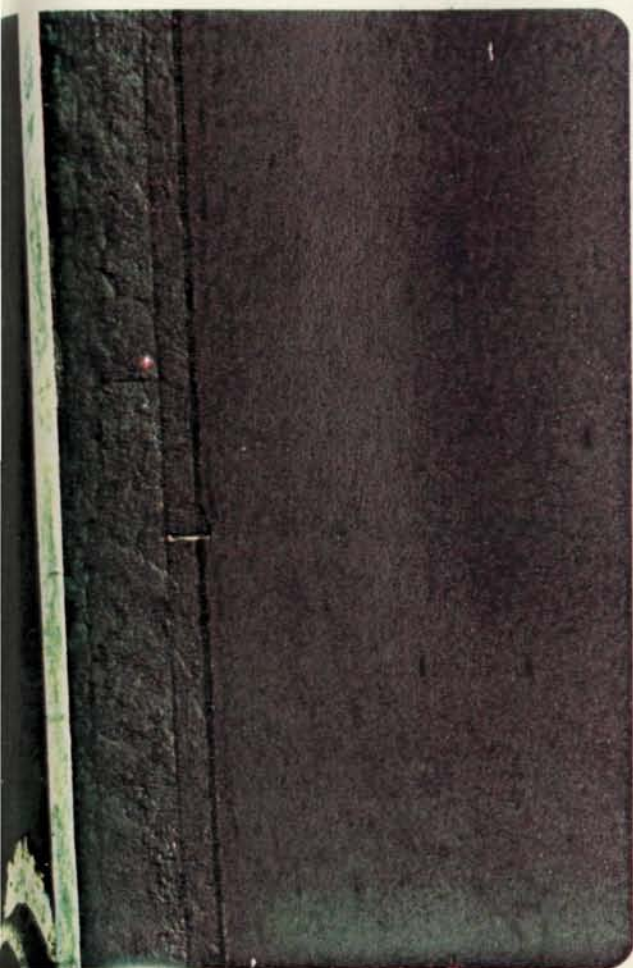
HORAS	EN (cm.)	$\frac{b}{a}$
		GRADO DE REDUC CION.-
0	15	1,00
1,25	14	0,93
5	11	0,73
24	7	0,46
48	5,5	0,36
72	5	0,33
96	4,5	0,30
120	4	0,26
192	3	0,20



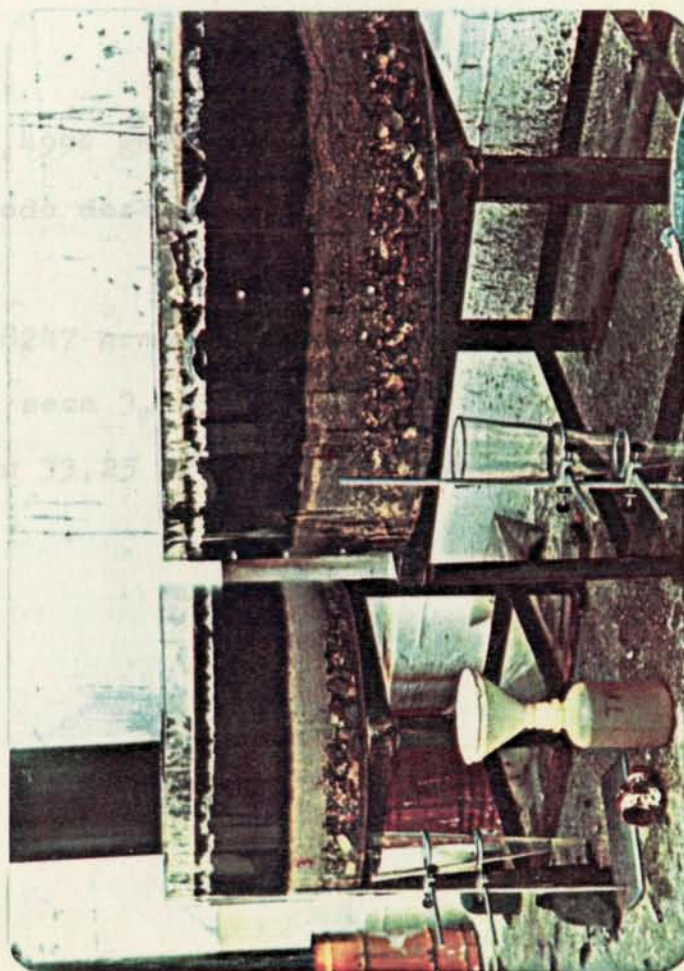
Descenso máximo en era experimental



Medición de descensos



Medición de descenso en era



Ensayo de velocidad de filtrado



1.4. Ensayos para la determinación de humedades y sólidos de filtrado.

1.4.1. Seguimiento de secado de lodos en eras experimentales.

Dichas eras son las definidas en el apartado 1.3 como E.01, E.02, E.03. E.04)

Determinación de sólidos en suspensión del lodo utilizado:

- Para las eras E.01 - E.02 y E.03.:

Referencia B.

peso papel 1,4994 grm.

100 ml. de lodo desecado a 100° durante 16 horas.

Peso seco 4.8247 grms. incluido papel.

peso materia seca 3,3253 grsm.

concentración 33,25 gr./litro equivalente al 3,3%

- Para E. 04

Referencia A

Peso papel 1,4966

100 ml. de lodo desecado a 100° durante 16 ho  
ras.

peso seco incluido papel 4,84999

peso materia seca 3,3533

concentración 33,53 gr./litro equivalente al  
3,3%.

- Parte superior de la torta de lodos que se forma  
a partir de los 10 minutos (tomada a las 18  
horas)

Referencia C

peso papel 1,4541 gr.

tara más sólido retenido 9,2850 gr.

100 ml. de lodo desecado a 100° durante 20 ho-  
ras.

concentración 78,30 gr./litro equivalente a -  
7,8%.

- Agua que se separa de la torta de lodo y se va  
filtrando (tomada a las 18 horas)

- Referencia D  
peso papel 1.5434  
100 ml. de agua filtrada y desecada a 100° duran  
te 20 horas.  
1.6988 gr. tasa más sólidos.  
Concentración 1,554 gr/litro equivalente a 1,5%
- Humedad determinada a las 100 horas de secado.  
Referencia E.04.1.  
Peso humedo del lodo y tara 143,1286gr.  
peso de lodo 136,9014 gs.  
peso de sólidos 19,9904 gr.  
humedad 85,39
- Referencia E.04.2  
peso humedo de lodo y tara 147,2531 gs.  
peso lodo 146,0621 gs.  
peso sólidos secos 36,1181 gs.  
humedad 75,27%
- Referencia E.04.3  
peso humedo de lodo y tara 117,2310 gs.  
peso de lodo 116,0365 gs.  
peso de sólidos secos 18,7595 gs.  
humedad 83,83%

- Referencia E.04.4

peso humedo de lodo y tara 132,8723 gs.

peso de lodo 131,6989 gs.

peso de sólidos secos 21,7097 gs.

humedad 83,51%

MEDIA DE HUMEDADES A LAS 100 HORAS 82%

Humedad determinada a las 244 horas

Referencia	Tara (gs.)	Tara y muestra humeda (gs.)	Tara y muestra seca (gr.)	Humedad (%)
E.04	52,7441	81,6085	61,5586	69,43
E.03	52,4738	125,7724	72,2621	73,00
E.02	51,7602	102,9116	60,6421	82,63
E.01	49,5187	101,0712	60,0921	79,49

Humedad determinada a los 14 dias

E.04	51,7541	86,8392	67,5842	54,88
E.02	52,7419	86,1470	63,1188	68,93
E.01	52,4683	90,8473	61,7508	75,81



1.4.2 Seguimiento de sólidos de filtrado en eras  
experimentales.

Referencia	Tara	ml. filtrados	Tara más sólidos retenidos	Concentración
------------	------	------------------	----------------------------------	---------------

A las dos horas de iniciar el ensayo

E.01	26,0270	50	26,0317	94 mg/l.
E.02	25,5017	50	25,5090	146 "
E.03	27,1477	50	27,1515	76 "
E.04	25,4279	50	25,4307	56 "

A las seis horas de iniciar el ensayo

E.01	25,7028	50	25,7062	68 mg/l.
E.02	30,2228	50	30,2272	117 "
E.03	26,0522	50	26,0539	34 "
E.04	24,4254	100	24,4261	7 "

A las dieciocho horas de iniciar el ensayo

E.01	25,8805	50	25,8825	40 mg/l.
E.02	25,8385	50	25,8439	108 "
E.03	26,3764	50	26,3779	30 "
E.04	25,0223	100	25,0229	6 "

1.4.3 Seguimiento de secado de lodos en eras de la  
estación depuradora de El Pardo y Manoterías.

Referencia	Tara (gr.)	Tara y muestra humeda (gs.)	Tara y muestra seca (gr.)	Humedad (%)
------------	---------------	--------------------------------	------------------------------	----------------

A los cinco días

P.4	48,1368	107,2553	56,0389	86,63
P.5	48,6035	119,6483	58,3027	86,34
P.6	44,5535	86,0812	50,3963	85,93

A los catorce días

P.2	49,5109	108,9490	63,6209	76,26
-----	---------	----------	---------	-------

(observación: con cinco días de lluvia)

P.1	52,4536	87,3687	72,9836	58,79
-----	---------	---------	---------	-------

A los veintiún días

P.8	48,6016	72,7899	57,7741	62,00
-----	---------	---------	---------	-------

A los treinta días

M.14	51,7381	62,7609	57,6635	46,24
------	---------	---------	---------	-------

A los cuarenta y cinco días

P.1	50,2820	72,3717	64,0609	37,62
-----	---------	---------	---------	-------

### 1.5. Ensayos de determinación de velocidades de filtración.

Para la determinación de la velocidad de filtración de el medio poroso se ha recurrido a la medición en un tiempo dado de la cantidad de filtrado sabiendo de antemano la superficie correspondiente.

Para ello se han hecho las siguientes determinaciones:

#### A) Ref. E. G1

Era experimental E.01 definida en el apartado 1.3. de este anejo.

Superficie total drenada 0,0706 m<sup>2</sup>.

#### 1º) Medición a las 26 horas de iniciado el proceso:

1,2 cm<sup>3</sup>. en un minuto equivalente a ..... 1,102 l/m<sup>2</sup>. hora

#### 2º) Medición a las 45 horas:

1,4 cm<sup>3</sup>. en un minuto equivalente a ..... 1,190 l/m<sup>2</sup>. hora

#### 3º) Medición a las 77 horas:

1 cm<sup>3</sup>. en un minuto equivalente a ..... 0,849 l/m<sup>2</sup>. hora

4º) Medición a las 120 horas

Simple goteo inapreciable

B) Ref. E.02

Era experimental E.02 definida en el apartado 1.3 de este anejo.

Superficie total drenada 0,0706 m<sup>2</sup>.

1º) Medición a las 26 horas

1,4 cm <sup>3</sup> . en un minuto equivalente .....	1,190 l/m <sup>2</sup> . hora
--	-------------------------------

2º) Medición a las 45 horas

0,8 cm <sup>3</sup> . en un minuto equivalente .....	0,679 l/m <sup>2</sup> . hora
--	-------------------------------

3º) Medición a las 77 horas

1,1 cm <sup>3</sup> . en un minuto equivalente .....	0,934 l/m <sup>2</sup> . hora
--	-------------------------------

4º) Medición a las 120 horas

Goteo inapreciable

## C) Ref. E.03

Era experimental E.03 definida en el apartado  
1.3.

Superficie total drenada 0,3728 m<sup>2</sup>.

## 1º) Medición a las 15 horas

78 cm<sup>3</sup>. en 10 minutos equi-  
valente ..... 1,255 l/m<sup>2</sup>. hora

## 2º) Medición a las 26 horas

4,5 cm<sup>3</sup>. en 1 minuto equi-  
valente ..... 0,724 l/m<sup>2</sup>. hora

## 3º) Medición a las 45 horas

3 cm<sup>3</sup>. en un minuto equi-  
valente ..... 0,482 l/m<sup>2</sup>. hora

## 4º) Medición a las 77 horas

5 cm<sup>3</sup>. en un minuto equi-  
valente ..... 0,804 l/m<sup>2</sup>. hora

## 5º) Medición a las 120 horas

Goteo inapreciable

## D) Ref. E.04

Era experimental E.04 definida en el apartado  
1.3.

Superficie total drenada 0,7766 m<sup>2</sup>.

1º) Medición a las 15 horas  
110 cm<sup>3</sup>. en diez minutos  
equivalente a ..... 0,849 l/m<sup>2</sup>. hora

2º) Medición a las 26 horas  
7 cm<sup>3</sup>. en un minuto equi  
valente a ..... 0,540 l/m<sup>2</sup>. hora

3º) Medición a las 45 horas  
6 cm<sup>3</sup>. en un minuto equi  
valente a ..... 0,463 l/m<sup>2</sup>. hora

4º) Medición a las 77 horas  
11 cm<sup>3</sup>. en un minuto equi  
valente a ..... 0,850 l/m<sup>2</sup>. hora

5º) Medición a las 120 horas  
Goteo inapreciable.

E) Ref. P.04

Era de secado en la estación depuradora de El  
Pardo, superficie total 60 m<sup>2</sup>.

Altura de lodos 30 cm.

1º) Medición a los diez minutos de iniciado el pro  
ceso.

8 segundos - 430 cm<sup>3</sup>.

5 " - 300 "

5 " - 270 "

Velocidad de filtración = 4,000.1/m<sup>2</sup>. hora

2º) Medición a la hora de iniciado el proceso

5 segundos - 260 cm<sup>3</sup>.

5 " - 270 "

5 " - 260 "

Velocidad de filtración = 3,160 1/m<sup>2</sup>. hora

3º) Medición a las 5 horas

6 segundos - 360 cm<sup>3</sup>.

6 " - 370 "

6 " - 300 "

6 " - 400 "

Velocidad de filtración = 4,766 1/m<sup>2</sup>. hora

4º) Medición a las 24 horas

10 segundos - 125 cm<sup>3</sup>.

10 " - 130 "

10 " - 130 "

Velocidad de filtración = 0,769 1/m<sup>2</sup>. hora

5º) Medición a las 48 horas

En 20 segundos 220 cm<sup>3</sup>. equivalente a 0,66 1/m<sup>2</sup>. hora

## 6º) Medición a las 72 horas

indicios pero no hay posibilidad de medirlo

## F) Ref. P.05

Era de secado de la estación depuradora de El Pardo superficie total 60 m<sup>2</sup>.

Arena de granulometria definida en el anejo 2 con la referencia P.05 01

Altura de lodos 25 cm.

## 1º) Medición a los 10 minutos de iniciado el proceso

5 segundos - 350 cm<sup>3</sup>.

3 " - 320 "

Velocidad de filtración = 5,933 l/m<sup>2</sup>. hora

## 2º) Medición a la hora de iniciado el proceso

3 segundos - 280 cm<sup>3</sup>.

3 " - 270 "

3 " - 270 "

Velocidad de filtración 5,46 l/m<sup>2</sup>. hora

## 3º) Medición a las 5 horas

3 segundos - 250 cm<sup>3</sup>.

3 " - 240 "

3 " - 220 "

Velocidad de filtración 4,733 l/m<sup>2</sup>. hora



4º) Medición a las 24 horas

10 segundos - 100 cm<sup>3</sup>.

10 " - 100 "

10 " - 100 "

Velocidad de filtración 0,67 l/m<sup>2</sup>. hora

5º) Medición a las 48 horas

En 20 segundos 140 cm<sup>3</sup>.

Velocidad de filtración 0,420 l/m<sup>2</sup>. hora

6º) Medición a las 72 horas

Indicios

G) Ref. P.06

Era de secado de la Estación Depuradora de  
El Pardo superficie total 60 m<sup>2</sup>.

Arena de granulometria definida en el anejo  
2 con la referencia P.06 01

En este ensayo hay que multiplicar el resul  
tado obtenido, por un factor de corrección-  
ya que no se podia recoger todo el filtrado  
y la medición es imprecisa.

Altura de lodos 15 cm.

- 1º) Medición a la hora de haber comenzado el proceso.

3 segundo - 180 cm<sup>3</sup>.

3 " - 140 "

3 " - 180 "

Velocidad de filtración corregida ( $f=1,4$ )

4,666 l/m<sup>2</sup>. hora

- 2º) Medición a las 5 horas

3 segundos - 170 cm<sup>3</sup>.

3 " - 180 "

2 " - 120 "

Velocidad de filtración corregida 4,240 l/m<sup>2</sup>.hora

- 3º) Medición a las 24 horas

10 segundos - 86 cm<sup>3</sup>.

10 " - 84 "

10 " - 80 "

Velocidad de filtración corregida 0,599 l/m<sup>2</sup>.hora

- 4º) Medición a las 48 horas

20 segundos - 45 cm<sup>3</sup>.

Velocidad de filtración corregida 0,162 l/m<sup>2</sup>.hora

- 5º) Medición a las 72 horas

Indicios

A N E J O   N º 2

ENSAYOS DE GRANULOMETRIA DE ARENAS  
=====

## 2.1. Introducción

Siendo parte esencial de una era de secado de lodos, el medio poroso que efectua la filtración, era necesario la determinación de sus parámetros representativos.

Al disponer de eras en funcionamiento continuo durante varios años, y bajo el control del autor durante los últimos cinco, parece necesario acompañar los datos prácticos con determinaciones teóricas. Un ejemplo a constatar es que las eras de secado, funcionan bien con arena de rio de Madrid. Interesante es definir esta arena, ya que nos proporciona el dato de que se puede aplicar cualquier arena de iguales características.

## 2.2. Definición de parámetros.

El material filtrante, se ha caracterizado por los siguientes factores:

### a) Curva granulométrica:

Curva representativa de los porcentajes en peso de los granos que pasan a traves de las mallas de una serie de tamíces normalizados.

- b) Talla efectiva: corresponde al paso de malla que deja pasar un 10% en peso.
- c) Coeficiente de uniformidad: relación de las -  
tallas correspondientes a los porcentajes 60-  
y 10 de la curva granulométrica.

$$C U = \frac{\text{Paso de malla correspondiente al tamiz por el que pasa 60\%}}{\text{Paso de malla correspondiente al tamiz por el que pasa 10\%}}$$

### 2.3. Método de ensayo.

La toma de muestras de las arenas de las eras se ha realizado de la siguiente forma:

- En cada era se ha tomado una muestra por cada 4 m<sup>2</sup>. procurando que fuera representativa de todo el estrato.
- Se procede a un cuarteo con las muestras recogido y se envasa  $\frac{1}{2}$  kg. en una bolsa de plástico que se envía al Laboratorio.
- En el Laboratorio se vuelve a cuartear y se somete a tamizado.

El tamizado se realiza con los tamices normalizados de la serie A.S.T.M. E - 11 - 39.

Los utilizados en estos ensayos son:

<u>TAMIZ NUMERO</u>	<u>VACIO ENTRE MALLAS (mm.)</u>
3	7,860
6	3,360
12	1,680
20	0,840
25	0,710
30	0,590
40	0,420
50	0,297
70	0,210
80	0,177

La muestra elegida, se somete a un tamizado de la columna de tamices, que encajan unos con otros a un movimiento de rotación y choque, hasta que se observa que no aparecen finos por el último.

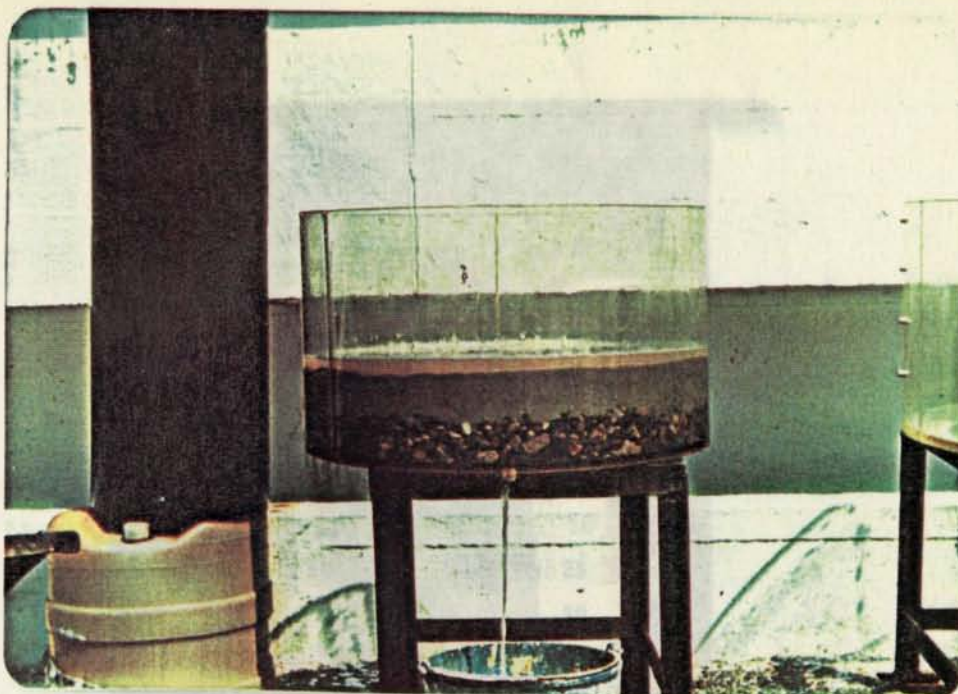
Las cantidades retenidas en cada tamiz, se pesan en una balanza de precisión, afinando hasta las centésimas de gramo.

Una vez obtenidas las pesadas, se confecciona la tabla de las mismas y se obtiene los gramos que pasan por cada tamiz y se halla el tanto por ciento respecto al total.

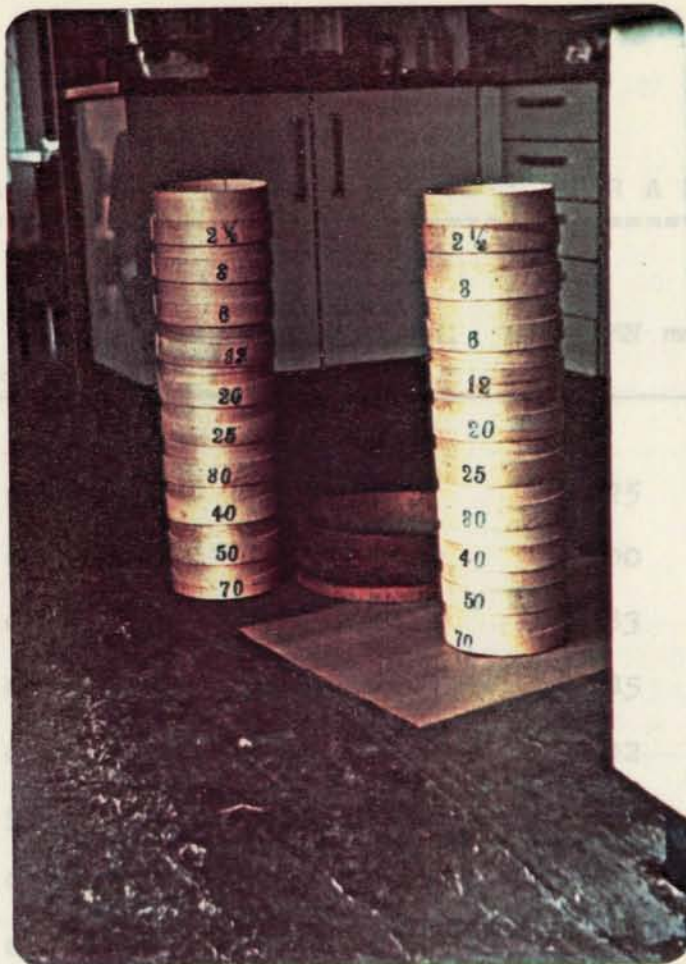
Con estos datos se representa una curva en la que los pasos de malla, están en escala logarítmica y los porcentajes en escala normal. En dicha curva se halla el paso correspondiente al 10% y 60%.

#### 2.4. Resultados

A continuación se relaciona una tabla resumen de las granulometrias realizadas, cada una de las curvas y sus tablas correspondientes, así como cuatro fotografías donde se puede apreciar la toma de muestras, los tamices y la operación de tamizado.







T A B L A   R E S U M E N   D E   G R A N U L O M E T R I A

=====

REFERENCIA	PASO EN mm.	PASO EN mm.	COEFICIENTE UNI FORMIDAD.-
	P.10	P.60	
P. 02.01	0,24	1,25	5,20
P. 05.01	0,24	1,00	4,16
P. 06.01	0,209	0,83	3,97
P. 08.01	0,46	1,85	4,02
P. 09.01	0,30	1,02	3,40
P. 9 .01	0,29	1,19	4,10
PR.01.01	0,23	0,95	4,10
M. 06.01	0,22	0,67	3,04
M. 08.01	0,235	0,73	3,53
M. 14.01	0,19	0,4	2,10
M.M.01	0,215	0,6	2,79
MA.01.01	0,23	0,7	3,04
CH.20.01	0,79	1,26	1,59
CH.01.01	0,43	0,80	1,86
FP.01.01	0,365	0,72	1,97

ANALISIS GRANULOMETRICO DE LAS  
ARENAS DE LAS ERAS DE SECADO

-----

REFERENCIA P-02.01..

OBSERVACIONES .....

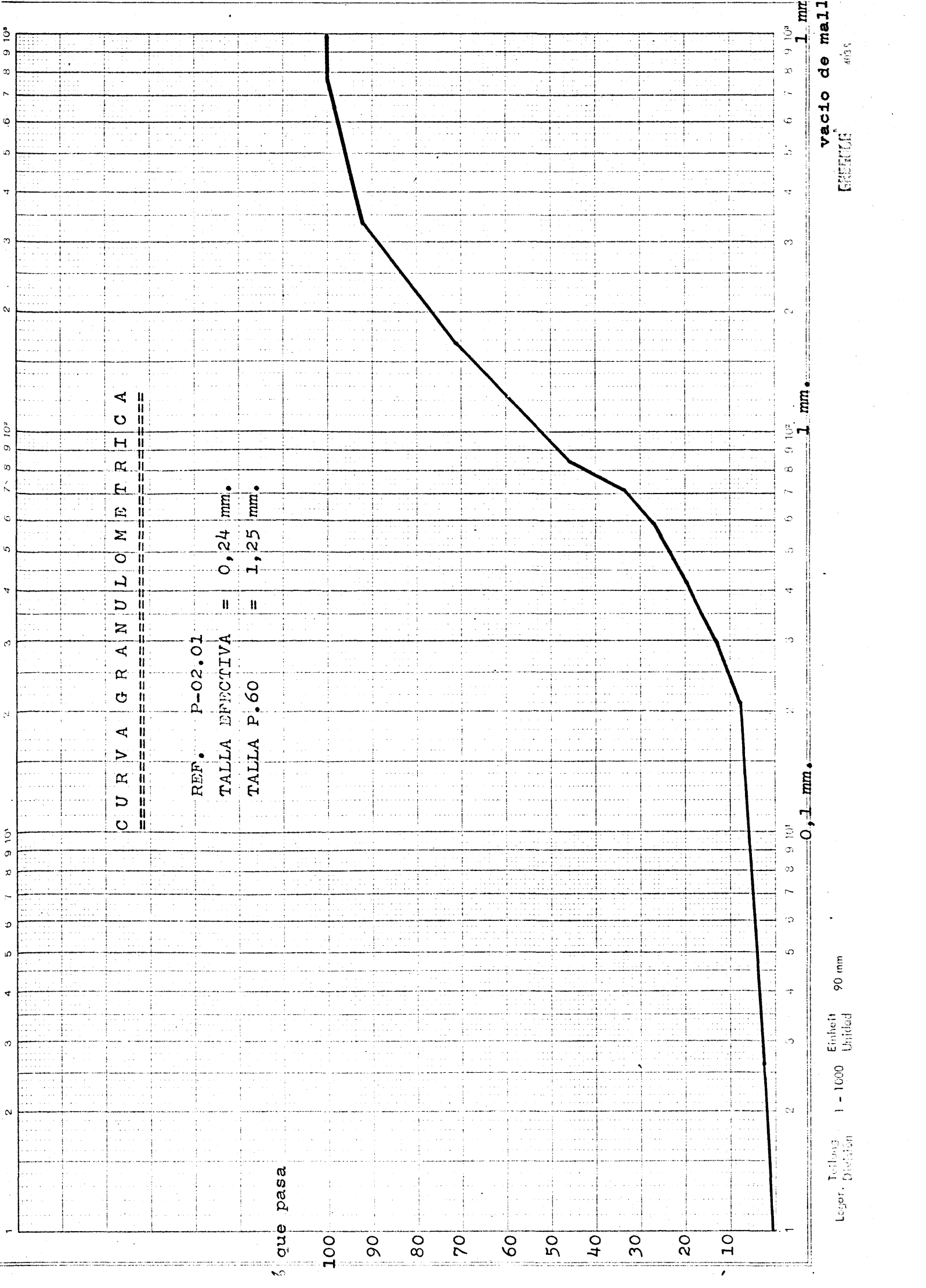
.....

PESO DE LA MUESTRA .120,67.Gm.

TAMIZ N° A.S.T.M.	CANTIDAD RETENI DA EN EL TAMIZ- EN GRAMOS.-	CANTIDAD QUE PA SA POR EL TAMIZ EN GRAMOS.-	PORCENTAJE QUE PASA POR EL TA MIZ.-
3	-	120,67	100
6	9,51	111,16	92,11
12	25,75	85,41	70,77
20	29,73	55,68	46,14
25	14,96	40,72	33,74
30	7,70	33,02	27,36
40	9,94	23,08	19,13
50	7,80	15,28	12,66
70	6,47	8,81	7,30

TALLA EFECTIVA 0,24. mm..

COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD .5,20.....



ANALISIS GRANULOMETRICO DE LAS  
ARENAS DE LAS ERAS DE SECADO

-----

REFERENCIA P-05.01..

OBSERVACIONES .....

.....

PESO DE LA MUESTRA 112,13 Gms.

TAMIZ Nº A.S.T.M.	CANTIDAD RETENI DA EN EL TAMIZ- EN GRAMOS.-	CANTIDAD QUE PA SA POR EL TAMIZ EN GRAMOS.-	PORCENTAJE QUE PASA POR EL TA MIZ.-
3	-	112,13	100
6	6,40	105,73	94,29
12	21,82	83,91	74,83
20	22,69	61,22	54,59
25	14,88	46,34	41,32
30	8,37	37,97	33,86
40	11,46	26,51	23,64
50	9,74	16,77	14,95
70	8,27	8,50	7,58

TALLA EFECTIVA 0,24 mm.

COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD 4,16.....

# ===== CURVA GRANULOMETRICA =====

RIF. P-05.01

TALLA EFECTIVA = 0,24 mm.

TALLA P.60 = 1,00 mm.

% que pasa

100

90

80

70

60

50

40

30

20

10

1

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10<sup>1</sup>

2 3 4 5 6 7 8 9 10<sup>2</sup>

3 4 5 6 7 8 9 10<sup>3</sup>

0,1 mm.

1 mm.

1 mm

vacio de mal

Teilung 1 - 1000 Einheit 90 mm  
Logr. Division

ENCLOSURE

4035

ANALISIS GRANULOMETRICO DE LAS  
ARENAS DE LAS ERAS DE SECADO

-----

REFERENCIA P-06.01.

OBSERVACIONES .....

.....

PESO DE LA MUESTRA 115,3 Gms.

TAMIZ Nº A.S.T.M.	CANTIDAD RETENI DA EN EL TAMIZ- EN GRAMOS.-	CANTIDAD QUE PA SA POR EL TAMIZ EN GRAMOS.-	PORCENTAJE QUE PASA POR EL TA MIZ.-
3	7	115,3	100
6	3,7	111,6	96,8
12	18,8	92,8	80,4
20	23,1	69,7	60,4
25	16,7	53,0	46,0
30	11,1	41,9	36,3
40	15,8	26,2	22,6
50	8,2	17,9	15,5
70	6,3	11,6	10,1
80	6,1	5,5	4,8

TALLA EFECTIVA ..0,209..

COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD ..3,97....



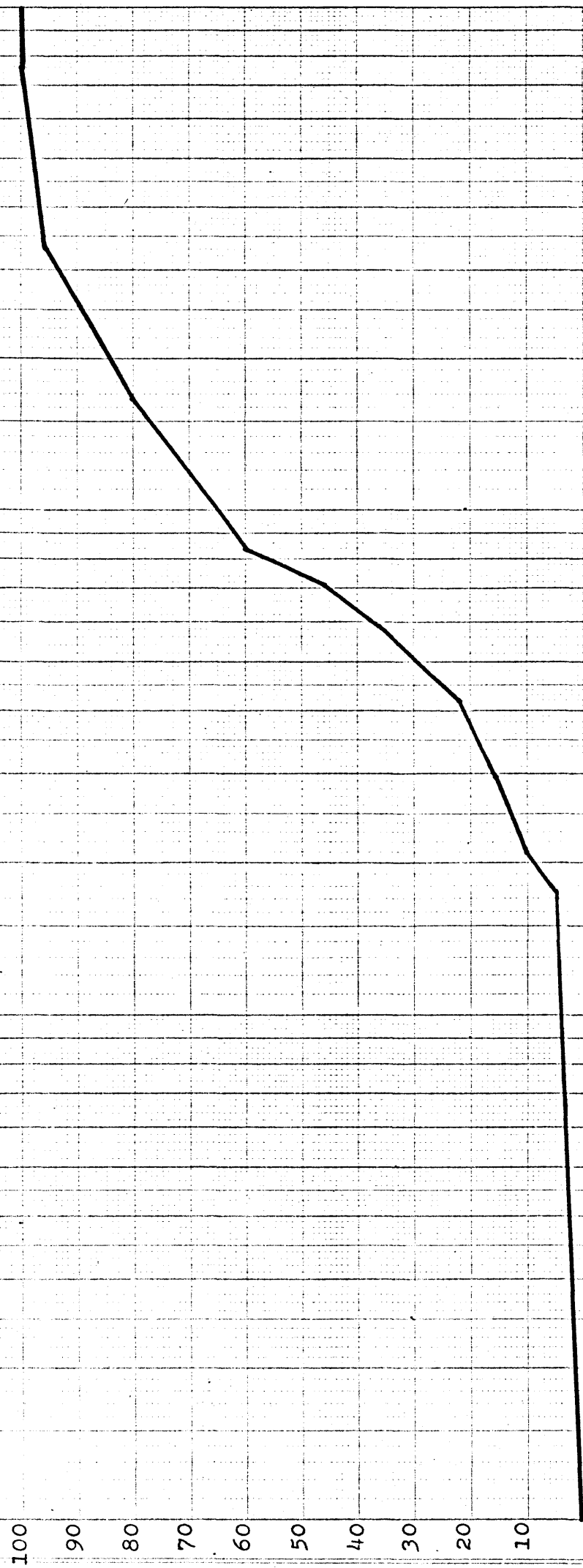
## CURVA GRANULOMETRICA

REF. P-06.01

TALLA EFFETTIVA = 0,209 mm.

TALLA P.60 = 0,83 mm.

que pasa



0.1 mm

1 mm.

**vacio de mal.**

Logar.	Teilung	Einheit	90 mm
		1 - 1000	Unidad

Logar. Teilung  
Division

503



ANALISIS GRANULOMETRICO DE LAS  
ARENAS DE LAS ERAS DE SECADO

-----

REFERENCIA P-08.01..  
P:0000000000

OBSERVACIONES .....

.....

PESO DE LA MUESTRA 173,66 Gms.

TAMIZ Nº A.S.T.M.	CANTIDAD RETENI DA EN EL TAMIZ- EN GRAMOS.-	CANTIDAD QUE PA SA POR EL TAMIZ EN GRAMOS.-	PORCENTAJE QUE PASA POR EL TA MIZ.-
3	-	173,66	100
3		173,66	100
6	21,59	152,07	87,56
12	55,17	96,90	55,79
20	38,09	58,81	33,86
25	21,98	36,83	21,21
30	10,11	26,72	15,38
40	11,61	15,11	8,70
50	6,08	9,03	5,20
70	3,42	5,61	3,23
80			

TALLA EFECTIVA .0.46 mm.

COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD ...4,92....

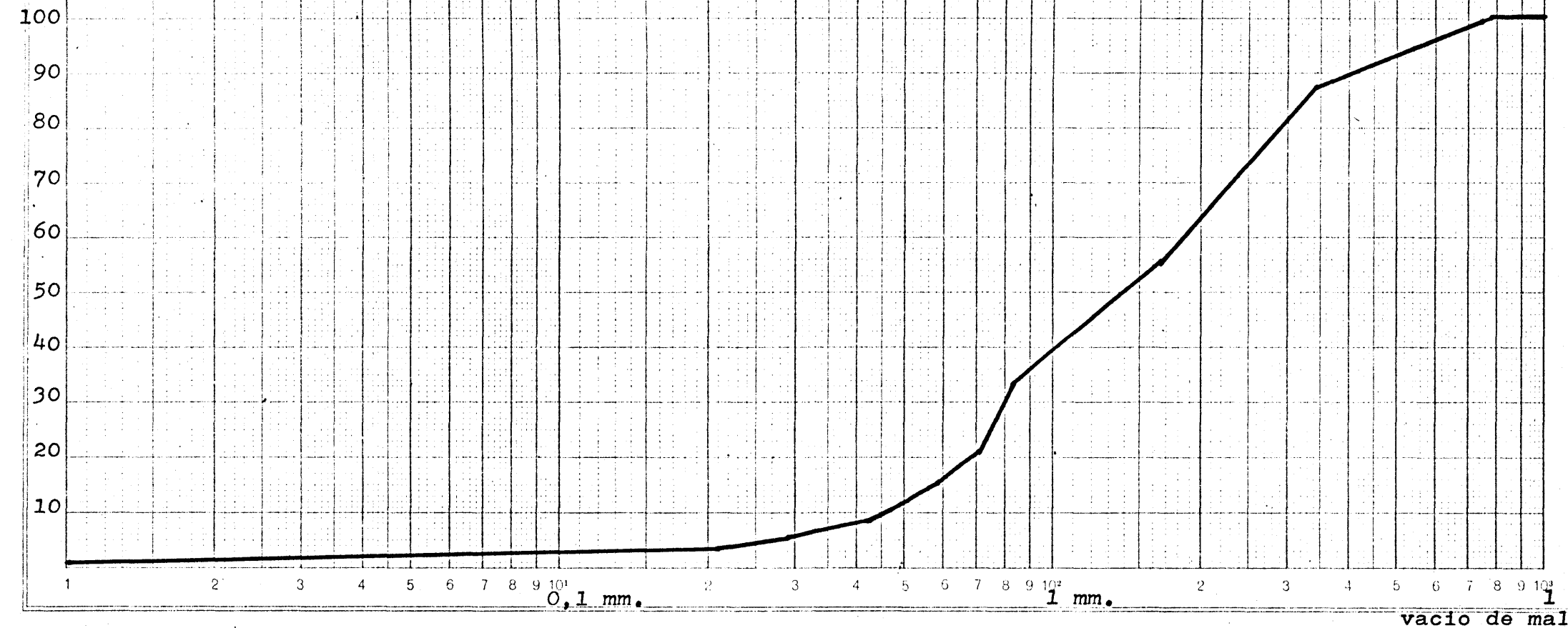
CURVA GRANULOMETRICA

REF. P-0801

TALLA EFECTIVA = 0,46 mm.

TALLA P.60 = 1,85 mm.

% que pasa



Logar. Teilung 1 - 1000 Einheit 90 mm  
División Unidad

CHESOLE

4035

ANALISIS GRANULOMETRICO DE LAS  
ARENAS DE LAS ERAS DE SECADO

-----

REFERENCIA P - 09.01  
.....

OBSERVACIONES .....

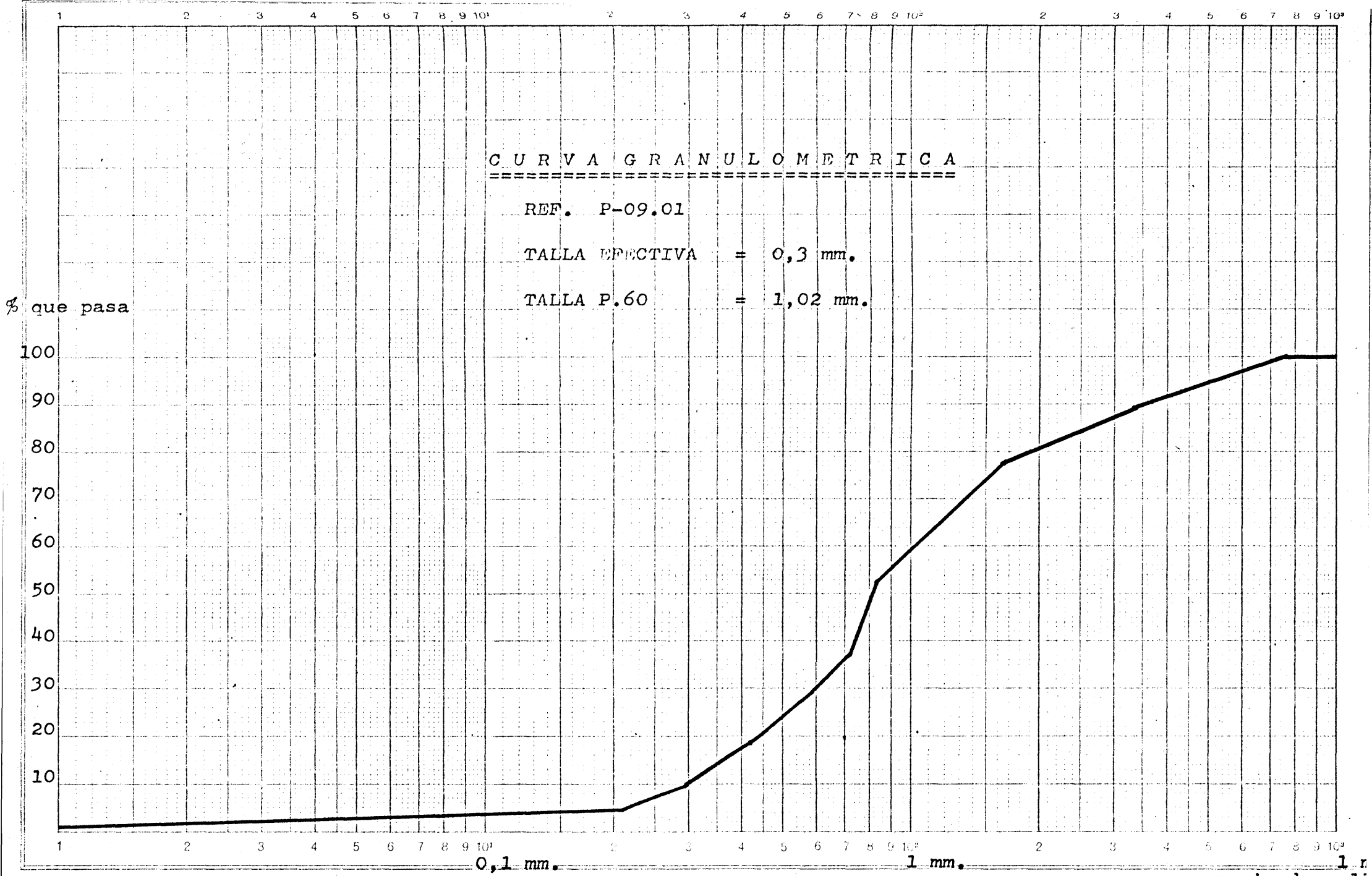
.....

PESO DE LA MUESTRA 80,54 Gms.

TAMIZ Nº A.S.T.M.	CANTIDAD RETENI DA EN EL TAMIZ- EN GRAMOS.-	CANTIDAD QUE PA SA POR EL TAMIZ EN GRAMOS.-	PORCENTAJE QUE PASA POR EL TA MIZ.-
3	-	80,54	100
6	8,87	71,67	88,98
12	8,93	62,74	77,89
20	20,31	42,43	52,68
25	12,50	29,93	37,16
30	6,54	23,39	29,04
40	8,80	14,59	18,11
50	6,68	7,91	9,82
70	4,47	3,44	4,27

TALLA EFECTIVA ..0,3 mm..

COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD ..3,4.....



ANALISIS GRANULOMETRICO DE LAS  
ARENAS DE LAS ERAS DE SECADO

-----

REFERENCIA P.R..01.01

OBSERVACIONES ..Arena de rio.....

PESO DE LA MUESTRA 97,08 Gms.

TAMIZ Nº A.S.T.M.	CANTIDAD RETENI DA EN EL TAMIZ- EN GRAMOS.-	CANTIDAD QUE PA SA POR EL TAMIZ EN GRAMOS.-	PORCENTAJE QUE PASA POR EL TA MIZ.-
3	-	97,08	100
6	3,27	94,61	97,45
12	20,47	74,14	76,37
20	18,91	55,23	56,89
25	13,69	41,54	52,38
30	8,16	33,38	34,38
40	10,51	22,87	22,73
50	8,18	13,89	14,31
70	6,17	7,72	7,95

TALLA EFECTIVA ...0,23.mm.

COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD ...4,1....

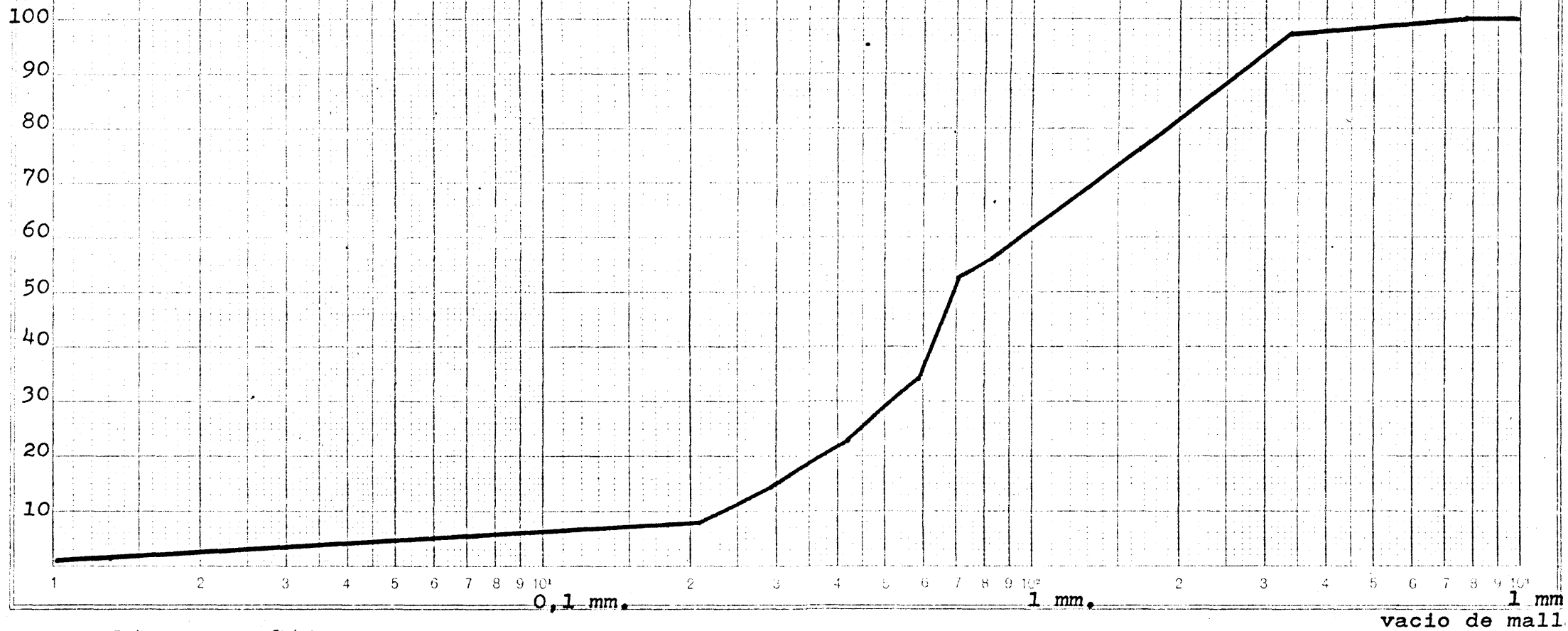
# CURVA GRANULOMETRICA

REF. P.R/ 01.01

TALLA EFECTIVA = 0,23 mm.

TALLA P.60 = 0,95 mm.

que pasa



ANALISIS GRANULOMETRICO DE LAS  
ARENAS DE LAS ERAS DE SECADO

-----

REFERENCIA M-06.01  
.....

OBSERVACIONES .....

.....

PESO DE LA MUESTRA 87,82 Gms.  
.....

TAMIZ Nº A.S.T.M.	CANTIDAD RETENI DA EN EL TAMIZ- EN GRAMOS.-	CANTIDAD QUE PA SA POR EL TAMIZ EN GRAMOS.-	PORCENTAJE QUE PASA POR EL TA MIZ.-
3	-	87,82	100
6	1,67	86,15	98,10
12	7,03	79,12	90,09
20	10,32	68,80	78,34
25	12,43	56,37	64,18
30	10,25	46,12	52,51
40	15,10	31,02	35,32
50	13,74	17,28	19,67
70	10,25	7,03	8,05

TALLA EFECTIVA ...0,22 mm.

COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD ...3,04...

# CURVA GRANULOMETRICA

REF. M-06.01

TALLA EFECTIVA = 0,22 mm.

TALLA P.60 = 0,67 mm.

que pasa

100

90

80

70

60

50

40

30

20

10

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

0,1 mm.

2

3

4

5

6

7

8

9

1 mm.

2

3

4

5

6

7

8

9

10

1 mm

vacio de malla



ANALISIS GRANULOMETRICO DE LAS  
ARENAS DE LAS ERAS DE SECADO

-----

REFERENCIA M.-08.01  
.....

OBSERVACIONES .....

.....

PESO DE LA MUESTRA 112,51 Gms.  
.....

TAMIZ Nº A.S.T.M.	CANTIDAD RETENI DA EN EL TAMIZ- EN GRAMOS.-	CANTIDAD QUE PA SA POR EL TAMIZ EN GRAMOS.-	PORCENTAJE QUE PASA POR EL TA MIZ.-
3	-	112,51	100
6	4,29	108,22	96,18
12	12,98	95,24	84,65
20	15,08	80,16	71,24
25	13,56	66,60	59,19
30	11,39	55,21	49,07
40	20,14	35,07	31,17
50	15,07	20,00	17,76
70	12,13	7,87	6,94

TALLA EFECTIVA ..0,235 mm.

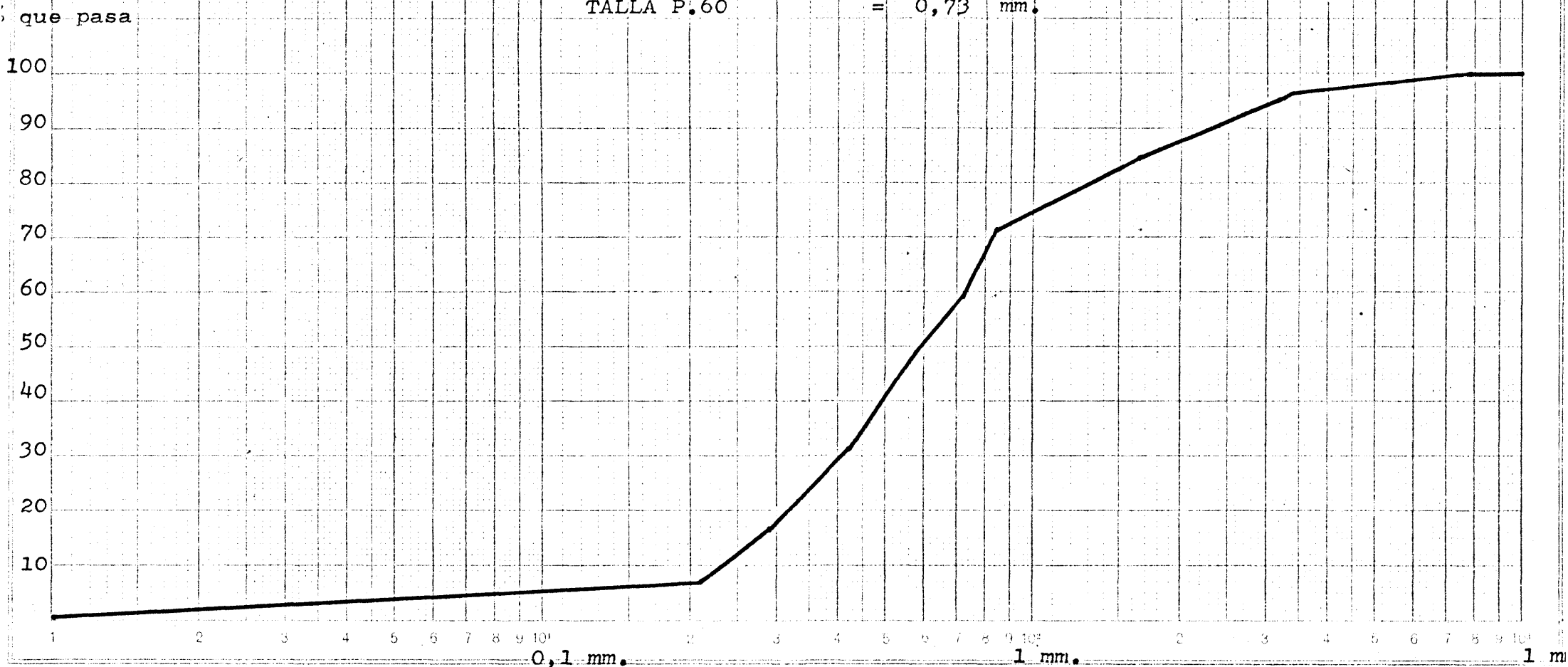
COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD ..3,53....

# CURVA GRANULOMETRICA

REF. M-08.01

TALLA EFECTIVA = 0,235 mm.

TALLA P.60 = 0,73 mm.



ANALISIS GRANULOMETRICO DE LAS  
ARENAS DE LAS ERAS DE SECADO

-----

REFERENCIA M., 14,01.

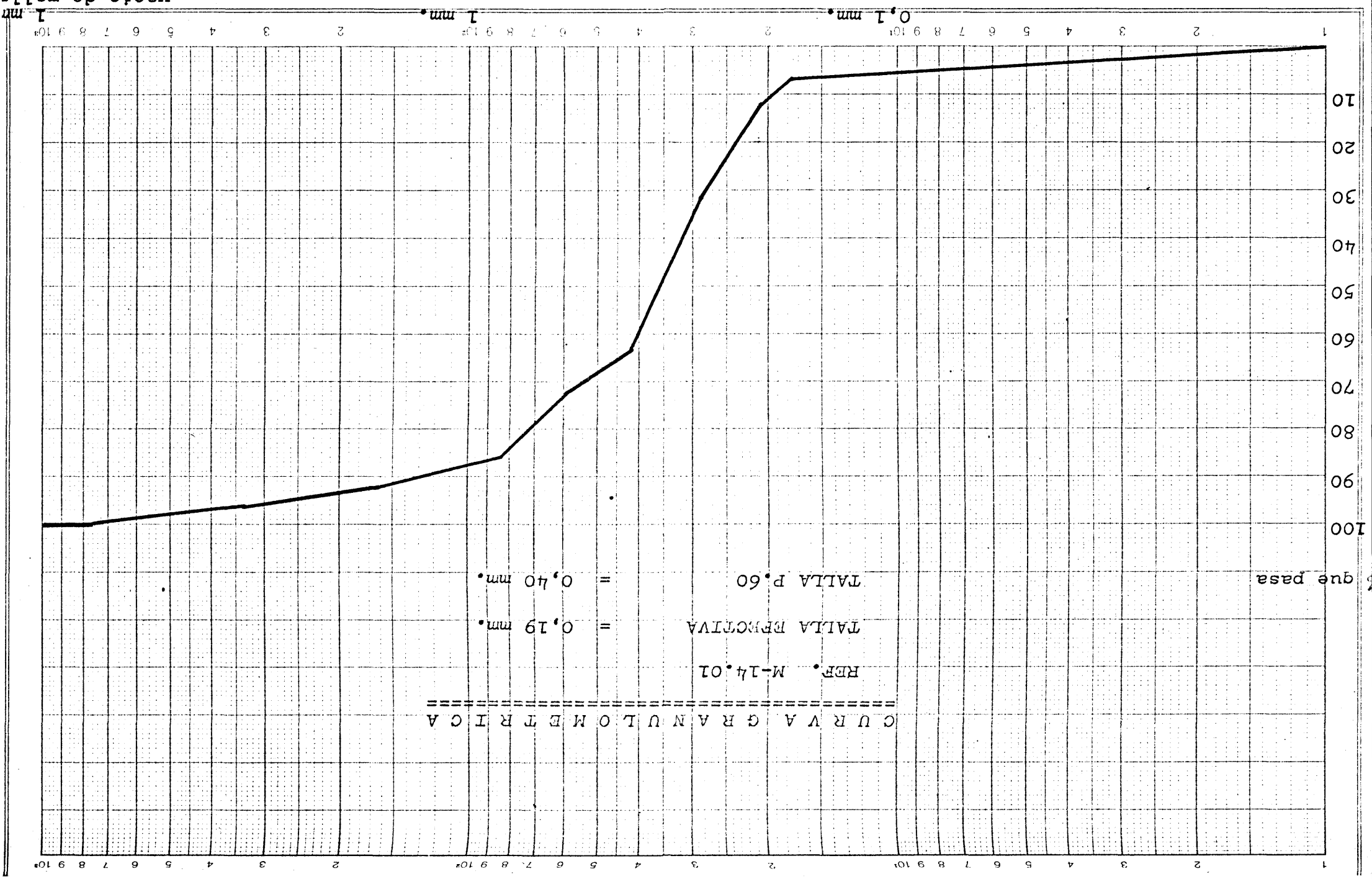
OBSERVACIONES .....

PESO DE LA MUESTRA .101,41....

TAMIZ N° A.S.T.M.	CANTIDAD RETENI DA EN EL TAMIZ- EN GRAMOS.-	CANTIDAD QUE PA SA POR EL TAMIZ EN GRAMOS.-	PORCENTAJE QUE PASA POR EL TA MIZ.-
3	-	101,41	100
6	2,73	98,68	97,30
12	5,21	93,47	92,17
20	5,44	88,03	86,80
25	7,33	80,70	79,57
30	7,37	73,33	72,31
40	18,81	54,52	53,76
50	22,54	31,98	31,53
70	18,55	13,43	13,24
80	6,80	6,63	6,93

TALLA EFECTIVA ...0,19. mm.

COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD ..2,1.....



ANALISIS GRANULOMETRICO DE LAS  
ARENAS DE LAS ERAS DE SECADO

-----

REFERENCIA    MA..01.01.

OBSERVACIONES    Procede del arenero.....  
.....

PESO DE LA MUESTRA    .110,13...

TAMIZ Nº A.S.T.M.	CANTIDAD RETENI DA EN EL TAMIZ- EN GRAMOS.-	CANTIDAD QUE PA SA POR EL TAMIZ EN GRAMOS.-	PORCENTAJE QUE PASA POR EL TA MIZ.-
3	-	110,13	100
6	-	110,13	100
12	7,83	102,30	92,89
20	17,54	84,76	76,96
25	17,64	67,12	60,94
30	13,42	53,70	48,76
40	20,73	32,97	29,93
50	14,43	18,54	16,83
70	10,51	8,03	7,3

TALLA EFECTIVA    .0,23. mm.

COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD    .3,04.....

CURVA GRANULOMETRICA

REF. MA-01.01

TALLA EFECTIVA = 0,23 mm.

TALLA P.60 = 0,70 mm.

% que pasa



1 mm.

0,1 mm.

ANALISIS GRANULOMETRICO DE LAS  
ARENAS DE LAS ERAS DE SECADO

-----

REFERENCIA CH..01.01.

OBSERVACIONES Graduada.para.usos.industriales.....

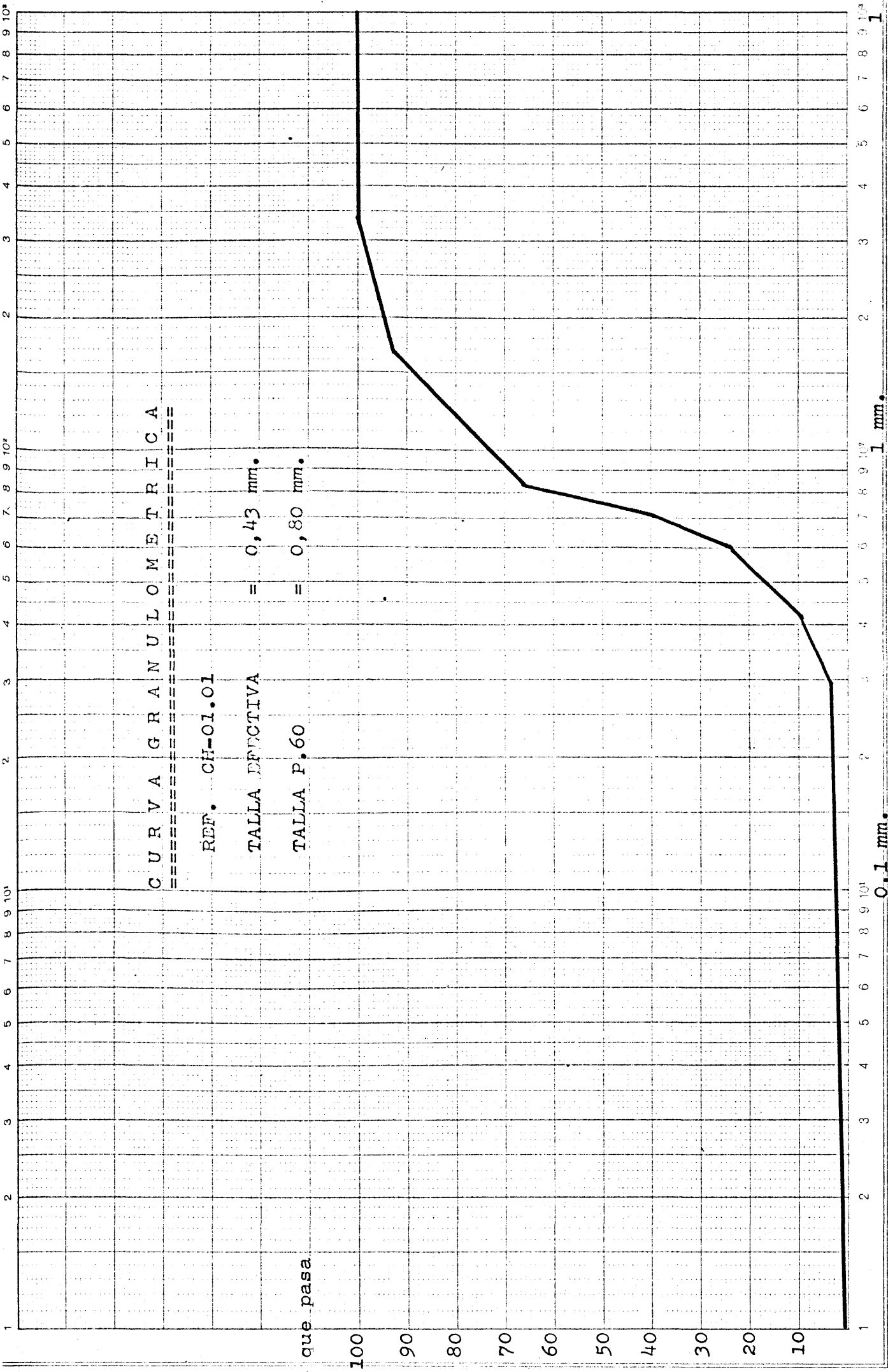
.....

PESO DE LA MUESTRA .158,12...

TAMIZ Nº A.S.T.M.	CANTIDAD RETENI DA EN EL TAMIZ- EN GRAMOS.-	CANTIDAD QUE PA SA POR EL TAMIZ EN GRAMOS.-	PORCENTAJE QUE PASA POR EL TA MIZ.-
3	-	158,12	100
6	-	158,12	100
12	11,54	146,58	92,74
20	41,98	104,60	66,19
25	41,98	62,62	39,60
30	25,77	36,85	23,30
40	22,06	14,79	9,35
50	9,64	5,15	3,25
70	-	-	-

TALLA EFECTIVA ..0,43...

COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD ..1,86....



CURVA GRANULOMETRICA

REF. CH-01.01

TALLA DEFECTIVA = 0,43 mm.

TALLA P.60 = 0,80 mm.



ANALISIS GRANULOMETRICO DE LAS  
ARENAS DE LAS ERAS DE SECADO

-----

REFERENCIA CH.20.01.

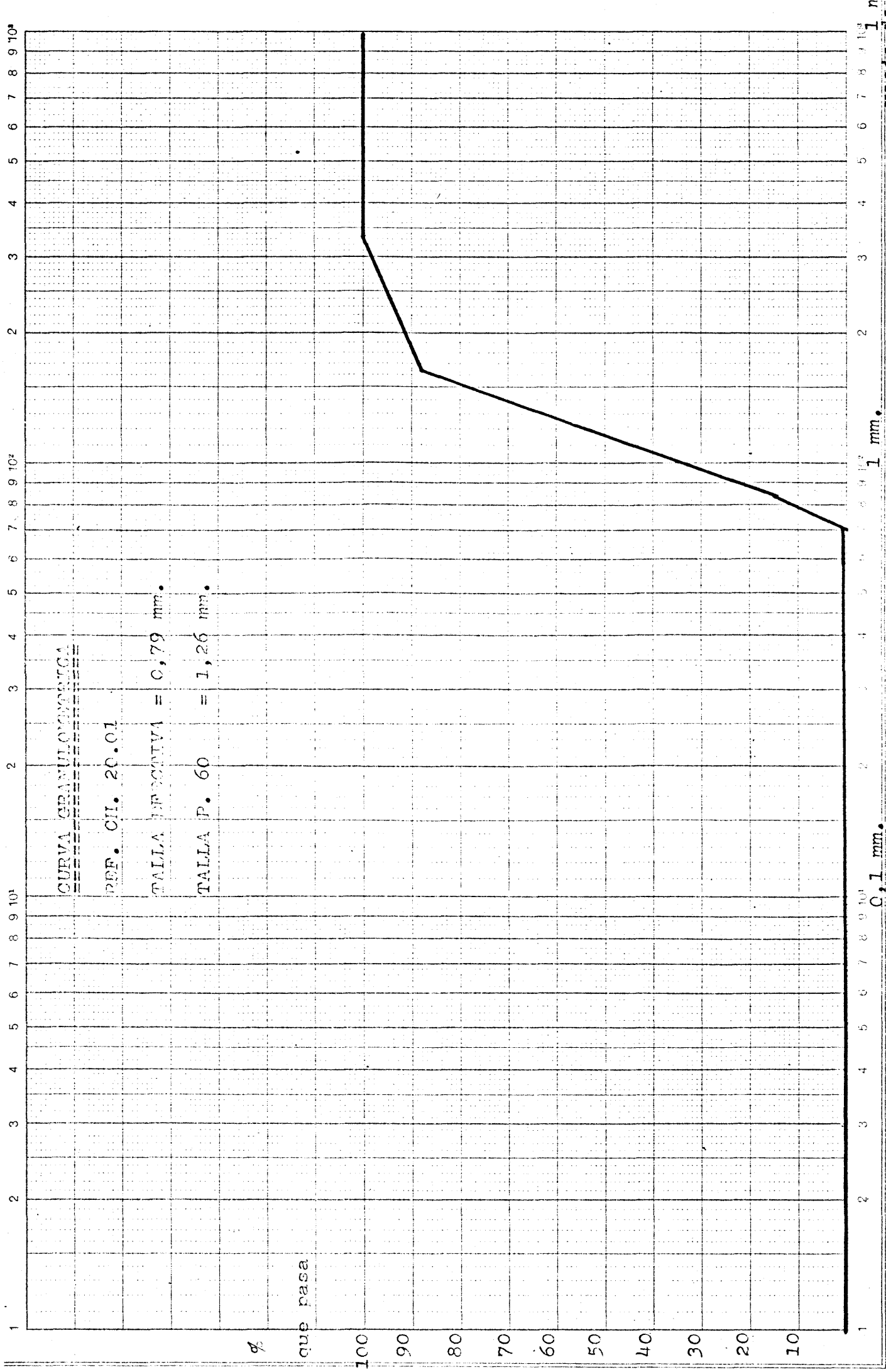
OBSERVACIONES Arena desprovista de finos.....

PESO DE LA MUESTRA ..176,57...

TAMIZ Nº A.S.T.M.	CANTIDAD RETENI DA EN EL TAMIZ- EN GRANOS.-	CANTIDAD QUE PA SA POR EL TAMIZ EN GRANOS.-	PORCENTAJE QUE PASA POR EL TA MIZ.-
3	-	176,57	100
6	-	176,57	100
12	20,85	155,72	88,69
20	129,29	26,43	14,97
25	25,26	1,17	0,66
30	0,82	0,35	0,19
40	-	-	-
50	-	-	-
70	-	-	-

TALLA EFECTIVA ..0,79.mm.

COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD ..1,59.....



## ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LAS

## ARENAS DE LAS ERAS DE SECADO

- - - - -

REFERENCIA F/P.Q1.Q1

OBSERVACIONES Filtros de agua potable.....

.....

PESO DE LA MUESTRA 88,64 .....

TAMIZ Nº A.S.T.M.	CANTIDAD RETENI- DA EN EL TAMIZ- EN GRAMOS.-	CANTIDAD QUE PA- SA POR EL TAMIZ EN GRAMOS.-	PORCENTAJE QUE PASA POR EL TA- MIZ.-
3	-	88,64	100
6	-	88,64	100
12	-	88,64	100
20	10,02	78,62	88,69
25	26,18	52,44	59,16
30	16,20	36,24	40,88
40	22,96	13,28	14,98
50	10,90	2,38	2,68
70	2,29	0,09	0,10

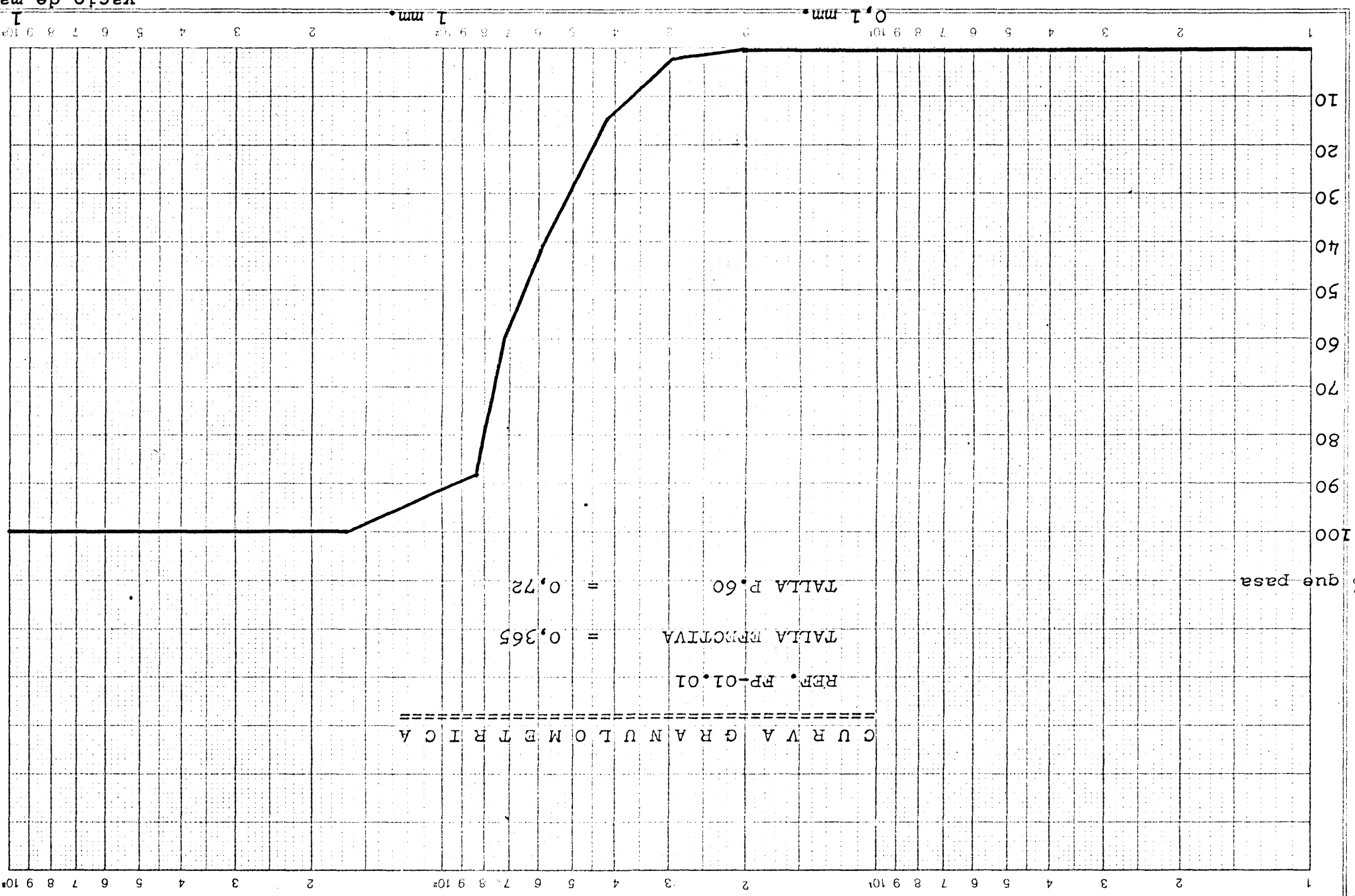
TALLA EFECTIVA ..0,365..

COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD 1,97.....

ENSENDE

4035

vacio de malla  
 1 mm.



A N E J O N º 3

D A T O S C L I M A T O L O G I C O S

=====

### 3.1 Introducción

Dado que todas las mediciones de comportamiento de eras, se han realizado en las estaciones depuradoras del Excmo. Ayuntamiento de Madrid, parece conveniente adjuntar los datos climatológicos de dicha zona.

Para ello se ha recurrido a los Anuarios Estadisticos de dicho Ayuntamiento y se han recogido losdatos del periodo 1.970 a 1.972. El periodo abarcadonos da unos datos medios suficientes para relacionarlas experiencias obtenidas con la climatología mediadel lugar.

Los datos aportados, son los que ha continuación se relacionan, debiendo destacar los apartados -  
referentes a Temperaturas, Humedades y Evaporaciones.

### 3.2. Cuadros, resúmenes y curvas.

Los cuadros y curvas climatológicos son:

#### 1.- Presión atmosférica a 0° mm.

1.1 media mensual

1.2 media de las máximas

1.3 media de las mínimas

2.- Temperaturas a 0° C

2.1 media mensual

2.2 media de las máximas

2.3 media de las mínimas

3.- Humedad relativa media %

4.- Precipitación en mm.

4.1 media mensual

4.2 número de días

4.3 número de días en los que la precipita  
ción es de nieve.

5.- Nubosidad

5.1 días despejados

5.2 días nublados

5.3 días cubiertos

6.- Insolación

6.1 horas de sol

6.2 % de insolación

7.- Evaporación media mm.

1.1. Media mensual

	Enero	Feb.	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	Anual Medio
1.960	705,95	703,40	701,65	705,50	704,70	706,20	705,45	706,40	705,50	701,90	705,90	703,20	704,645
1.961	707,40	712,65	709,90	703,45	705,50	706,30	706,35	707,20	706,40	706,20	702,05	706,00	706,616
1.962	709,15	709,00	700,85	705,00	706,20	707,10	706,05	707,05	706,45,	706,45	703,30	706,45	706,087
1.963	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1.964	712,00	705,35	702,55	704,75	706,20	705,65	707,20	705,65	707,95	707,35	708,40	704,80	706,487
1.965	705,45	706,45	706,75	705,75	705,85	706,00	705,65	706,25	704,90	705,35	705,20	707,60	705,933
1.966	705,10	703,50	709,20	704,00	706,70	706,50	705,40	705,50	706,80	703,00	706,00	709,10	705,900
1.967	715,40	713,40	715,70	709,60	710,90	713,50	712,20	711,70	712,40	713,40	711,20	705,50	712,075
1.968	717,40	708,40	711,60	710,10	711,10	711,30	713,90	711,10	711,90	714,40	708,80	710,40	711,700
1.969	711,40	707,20	708,20	711,00	710,60	710,70	714,20	711,50	712,00	713,40	711,40	711,50	711,091
1.970	707,70	714,80	710,30	713,70	711,20	711,80	712,10	711,10	713,30	714,50	713,70	713,50	712,30
1.971	711,2	714,3	709,00	706,5	708,3	712,00	712,3	711,5	713,2	717,00	712,3	715,9	711,95
1.972	710,3	708,4	709,6	710,4	711,1	710,4	711,7	712,1	711,1	711,5	714,9	715,5	711,41
Media Período	709,86	709,55	707,94	707,47	708,19	708,95	709,37	708,91	709,32	709,53	708,59	709,11	

Media anual del período = 708,89



1.2. Media de las máximas

	Enero	Feb.	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	Anual Medio
1.960	707,90	705,90	703,50	706,80	705,90	707,40	706,80	706,40	706,80	703,70	707,40	705,50	706,117
1.961	709,20	713,90	711,10	705,00	705,70	707,60	707,70	708,50	707,50	707,50	703,80	707,50	707,900
1.962	710,90	710,50	702,40	706,70	707,50	708,40	707,30	708,10	707,70	707,60	704,90	708,30	707,525
1.963	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1.964	713,20	707,30	704,80	706,00	707,40	707,10	708,50	707,00	709,10	708,70	709,90	706,60	707,967
1.965	707,70	709,90	708,50	707,30	707,20	707,10	706,80	707,60	706,60	706,70	707,30	709,40	707,675
1.966	706,80	706,30	710,50	706,00	708,50	707,70	706,60	706,60	708,00	704,60	708,10	710,80	707,542
1.967	717,50	715,50	717,90	711,40	712,50	714,60	713,50	713,10	713,70	714,70	713,80	707,40	713,80
1.968	719,00	710,20	713,30	711,90	712,90	713,10	711,10	712,60	714,30	715,90	711,40	712,80	713,208
1.969	713,40	710,10	710,30	712,70	712,10	712,00	715,70	712,80	713,30	715,10	715,20	713,60	713,025
1.970	710,30	716,80	712,30	715,50	712,80	713,50	713,50	712,50	714,80	716,40	715,70	715,30	714,117
1.971	713,6	716,3	711,2	708,6	709,8	713,2	713,7	713	714,6	718,3	714,4	718	713,724
1.972	718	719,2	717,6	719	720	715,9	719	717,3	718,2	720,5	720,2	723,4	719,024
Media Período	712,28	711,77	708,61	709,64	710,79	710,63	710,85	710,52	711,16	711,02	711	711,55	

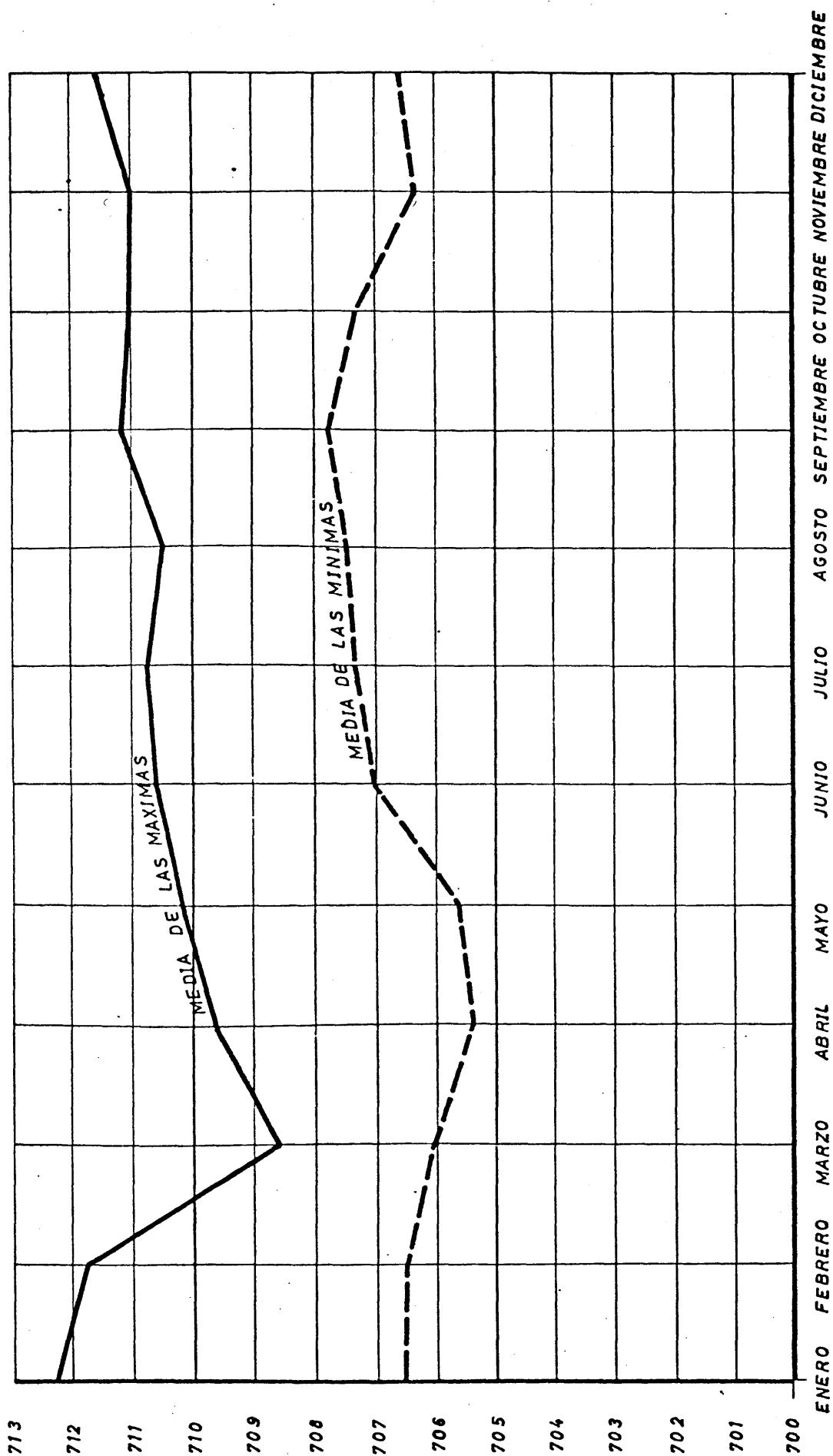
Media anual del periodo de las máximas = 710,768

1.3. Media de las mínimas

	Enero	Feb.	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	Anual Medio
1.960	704,0	701,5	699,8	704,2	703,5	705,0	704,1	706,4	704,2	700,1	704,9	700,9	703,175
1.961	705,6	711,4	708,7	701,9	705,3	705,0	705,0	706,1	705,3	704,9	700,3	704,5	705,333
1.962	707,4	707,5	699,3	703,3	704,9	705,8	704,8	706	705,2	705,3	701,7	704,6	704,65
1.963	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1.964	710,8	703,4	700,3	703,5	705,0	704,2	705,9	704,3	706,8	706,0	706,9	703	705,008
1.965	703,2	704,8	705,2	704,2	704,5	704,9	700,9	704,7	703,4	704,2	702,9	705,8	704,058
1.966	703,6	700,5	707,9	702,4	705,2	705,3	704,2	704,3	705,7	701,7	704,5	707,7	704,417
1.967	713,6	711,9	713,9	703,3	709,4	712,5	710,9	710,3	711,1	712,2	708,7	704,2	710,583
1.968	715,9	707,1	710,0	708,7	709,4	710,1	711,1	709,8	712,0	713,2	707,3	708,5	710,258
1.969	709,7	705,3	706,5	709,9	709,5	709,5	712,8	710,2	711,0	712,4	710,0	709,8	709,717
1.970	706,0	713,3	708,8	712,6	709,8	710,4	710,8	710	711,9	713,3	712	712,5	710,950
1.971	708,7	712,8	707,4	704,7	707,4	710,8	710,9	710,2	712,1	716,1	710,8	714,5	710,533
1.972	691	698,8	705	701,4	693,3	702,2	706,6	705,9	704,8	698,7	706,7	703,2	701,466
Media Periodo	706,62	706,52	706,06	705,42	705,60	707,05	707,33	707,50	707,70	707,34	706,35	706,60	

Media anual del periodo de las mínimas = 706,68

— PRESION ATMOSFERICA A 0° —



2.1. Media mensual

	Enero	Feb.	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	Annual Medio
1.960	5,7	7,1	10,4	13,6	16,9	22,3	23,8	22,6	19,8	11,4	8,9	4,7	13,93
1.961	4,6	10,2	12,9	13,7	18,3	21,5	24,5	24,3	21	13,7	9	7	15,06
1.962	6,9	7,5	8,7	12,4	16,8	21	24,2	25,4	21,4	16,1	6,7	4,4	14,29
1.963	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1.964	5,8	8,1	8,9	12,5	20,5	20,7	24,7	23,8	22,7	13,7	9,5	5,3	14,68
1.965	4,2	4	9,8	12,1	17,9	22	22,9	23,8	16,5	13,8	8,4	6,4	13,48
1.966	7,3	8,5	8,3	11,1	16,5	19,6	23,6	23,5	21,5	12,3	6	5,3	13,63
1.967	4,3	6,6	11	10,7	13,6	18,5	25,1	23,1	18,9	15,9	9,5	4	13,43
1.968	4,7	7	8,7	11,7	14,8	21,1	24,1	23,1	19,3	16,8	8,6	6,5	13,87
1.969	6,3	4,7	8,6	11,6	14,6	18,3	24,8	23,5	16,6	14,9	7,5	4,5	12,99
1.970	7	6	6,9	11,7	15,8	20,5	24,7	23,2	21,6	13,3	11,1	2,2	13,67
1.971	4,2	7	6,3	11,5	13,3	17,4	23,4	22,3	22,2	16	7,1	6,8	13,12
1.972	4,3	7	9	11,3	14,7	19,7	23,8	22,3	17	12,9	9,8	5,6	13,11
Media Período	5,44	6,97	9,12	11,88	16,14	20,21	24,13	23,40	19,87	14,23	8,50	5,22	

Media del período = 13,75

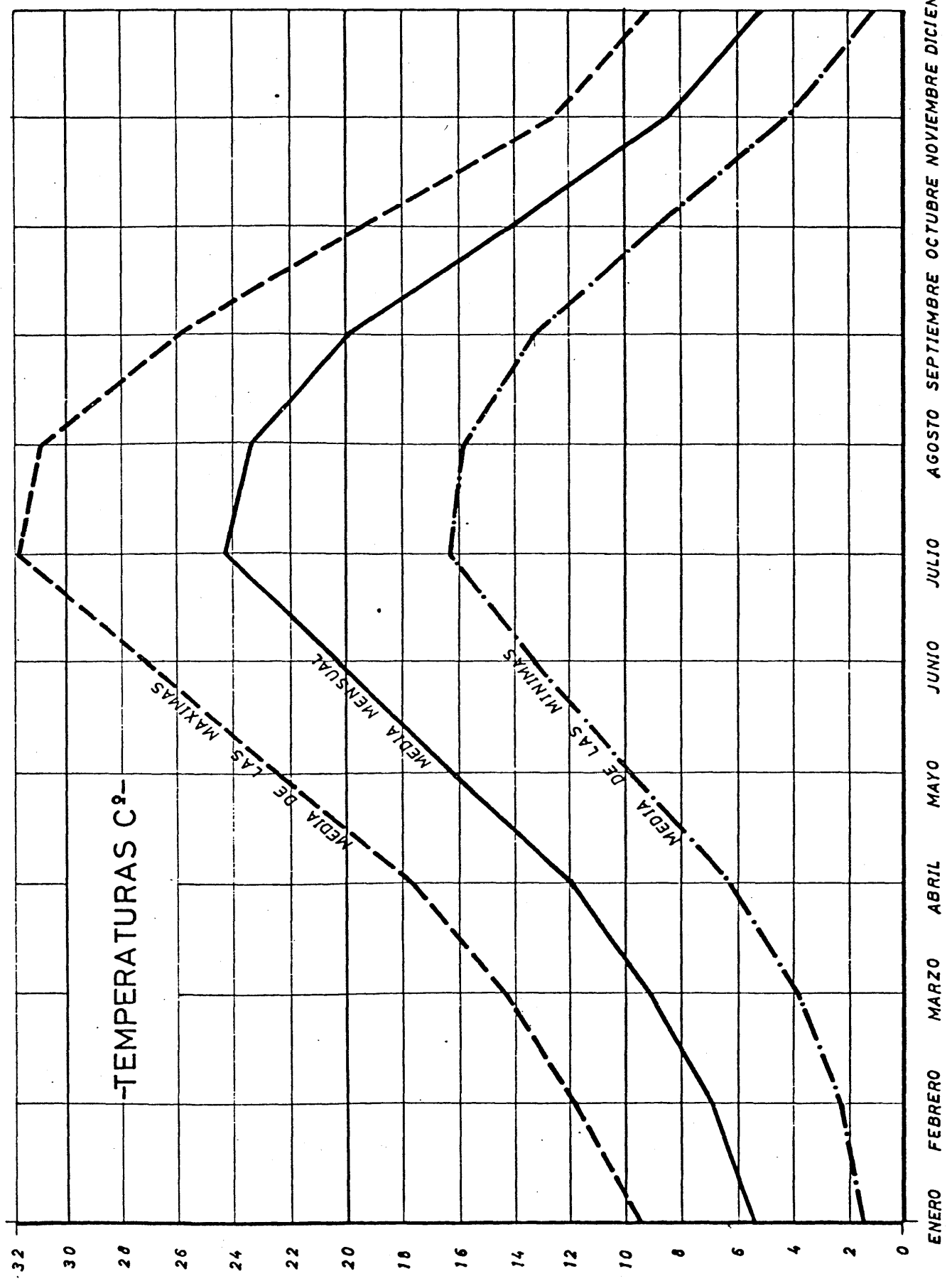
	Enero	Feb.	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	Anual Medio
1.960	8,7	10,2	14,5	19,7	22,1	28,1	30,1	28,5	25,1	14,6	11,5	7,7	18,40
1.961	7,5	15,3	18,7	18,5	23,9	27,6	30,7	30,6	26,4	17,9	11,7	9,7	19,88
1.962	10,4	12,3	12,1	17,1	22,5	26,8	30,3	31,7	26,7	19,9	10,4	8,4	19,05
1.963	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1.964	9,7	12	12,9	17,5	26,2	26,2	30,3	29,8	28,2	18,3	14,0	8,5	19,47
1.965	8,3	9	14,8	18,6	24,6	28,6	31,1	30,4	22,3	18	11,9	10,1	18,98
1.966	9,5	12,4	15,5	15,4	24,1	27,1	32,3	32,5	27,8	15,7	10	10	19,36
1.967	9,5	11,8	18,1	17,2	20,4	26,3	34,8	32,4	27,1	22,7	13,9	8,6	20,23
1.968	12,5	11,1	13,7	17	21,7	29,7	32,6	31	26	25,2	13,6	10	20,34
1.969	10,7	9,8	13,2	17,5	20,3	25,8	33,8	31,9	22,9	20,8	12,4	9,9	19,08
1.970	9,9	12,2	13,7	19,3	23,3	27,6	33,3	31	30,3	21,1	16,5	7,3	20,46
1.971	8,4	14,2	11,5	16,5	18	24,3	31,6	30,8	28,5	23,3	13,2	11,19	19,35
1.972	8,6	11,5	14	18,3	22	27,5	32,2	30,3	20,4	17	13,2	9,4	18,70
Media Período	9,47	11,81	14,39	17,69	22,42	27,13	31,92	30,90	25,97	19,54	12,69	9,23	

Media anual del periodo (medias máximas) = 19,43

2.3. Media de las mínimas

	Enero	Feb.	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	Annual Medio
1.960	2,7	4	6,3	7,5	11,7	16,5	17,5	16,7	14,5	0,2	6,3	1,7	9,47
1.961	1,7	5,1	7,1	8,9	12,7	15,4	18,3	18,1	15,6	9,5	6,3	4,3	10,25
1.962	3,4	2,7	5,4	7,7	11,1	15,2	17,9	19,1	16	12,3	3	0,4	9,52
1.963	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1.964	2	4,2	5	7,5	14,8	15,2	19	17,8	17,2	9,1	5,0	2,1	9,91
1.965	0,1	1	4,8	5,6	11,2	15,4	14,7	17,3	10,7	9,5	4,9	2,7	8,16
1.966	5	4,7	1,1	6,8	8,8	12,1	14,9	14,5	15,3	9	1,9	0,6	7,89
1.967	-0,9	1,4	3,9	4,3	6,9	10,7	15,4	13,8	10,7	9,1	5,2	-0,6	6,66
1.968	-3	2,9	3,7	6,4	7,9	12,5	15,6	15,2	12,6	8,4	3,6	3	7,40
1.969	1,9	-0,5	3,9	5,7	8,9	10,9	15,8	15,1	10,4	8,9	2,6	-0,9	6,89
1.970	4,1	-0,2	0,1	4	8,2	13,4	16,2	15,4	12,9	5,5	5,6	-2,7	6,88
1.971	-0,0	-0,2	1,1	6,5	8,6	10,6	15,2	13,8	11,9	8,7	0,9	1,7	6,56
1.972	0	2,6	4	4,3	7,3	11,8	15,5	14,3	11,6	8,8	6,4	1,8	7,36
Media Período	1,41	2,30	3,86	6,26	9,84	13,30	16,33	15,92	13,28	8,91	4,30	1,17	

Media anual del período (media máximas) = 8,07

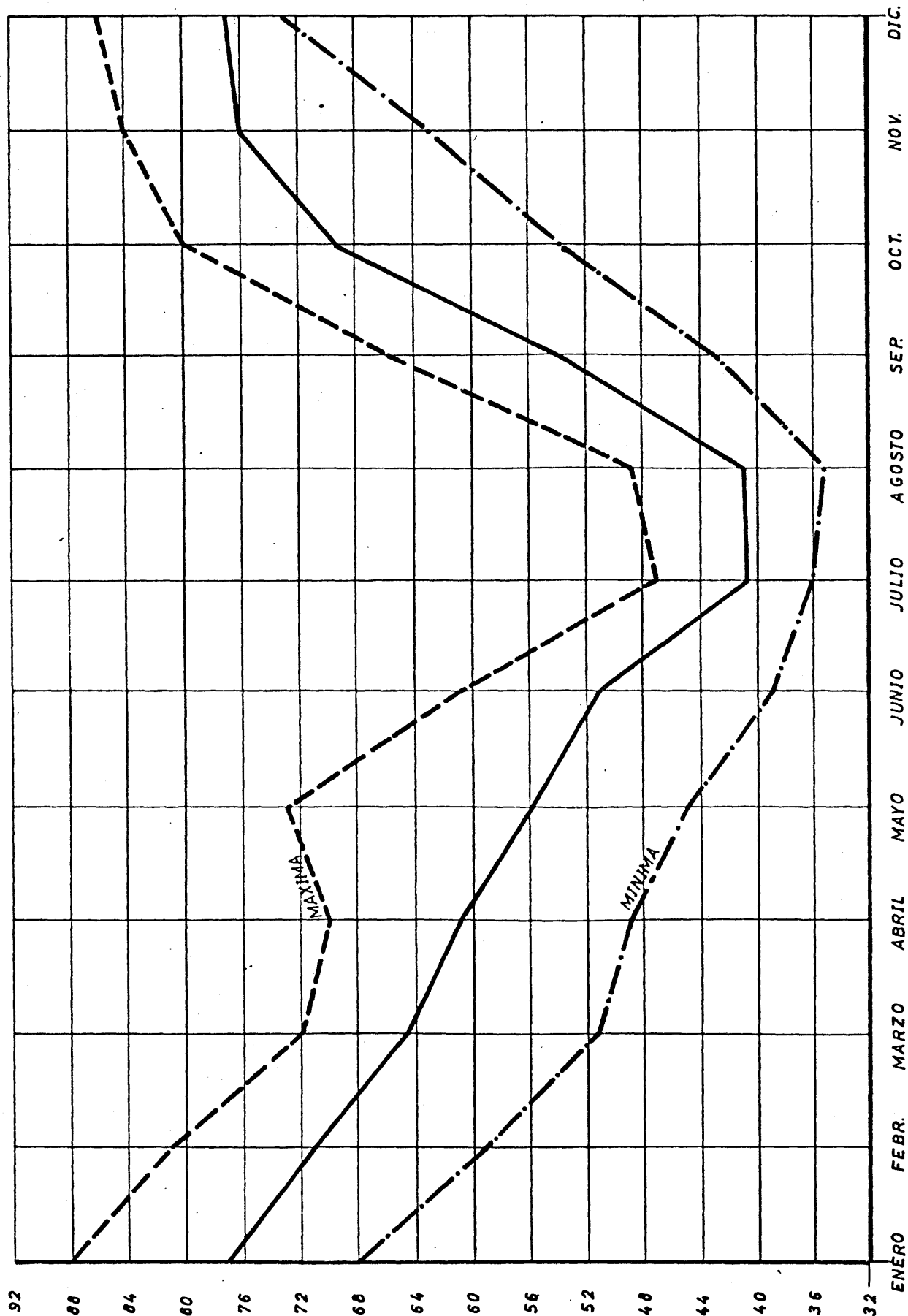


	Enero	Feb.	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	Anual Medio
1.960	79	79	69	51	60	51	40	43	53	-80	82	74	63,42
1.961	79	68	51+	64	51	47	42	44	57	73	79	-86	61,75
1.962	80	63	-72	67	57	53	39	35+	52	74	75	75	61,83
1.963	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1.964	74	73	71	61	48	54	44	40	48	60	65	73	59,25
1.965	71+	69	68	54	45+	39+	37	37	53	81	80	83	59,75
1.966	-88	-81	56	-70	54	53	42	43	51	77	76	74	63,75
1.967	80	75	67	67	60	50	41	40	55	65	79	73	62,67
1.968	68+	77	67	65	57	44	40	-49	59	60	-84	80	62,50
1.969	82	71	70	65	64	53	39	41	62	70	77	73+	63,92
1.970	83	67	57	49+	49	50	36+	41	43+	54+	70	79	56,50
1.971	77	59+	60	66	-73	-61	-47	46	49	64	63+	75	61,66
1.972	74	73	69	52	53	48	41	43	-66	78	83	81	63,41
Media Período	77,91	71,25	64,75	60,91	55,91	50,25	40,66	41,83	54	69,66	76,08	77,16	

Media anual del periodo: 61,69



— HUMEDAD RELATIVA MEDIA % —



4.1. Media mensual

	Enero	Feb.	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	Annual Medio
1.960	64,4	75,1	44,2	4,9	70,9	27	5,8	9,9	9,4	170,9	54,3	51,2	49,0
1.961	23,4	3,4	12,9	60,9	33,2	6,5	15,8	13,9	60,3	23,2	137,2	55	37,14
1.962	46,3	26,4	89,1	80,4	47,3	30,1	0,0	0,0	45,1	57	26,2	64,9	42,73
1.963	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1.964	5,9	109,8	40,4	18,8	19,6	58,1	11,1	0	11,1	6,7	18,9	55,5	29,66
1.965	60,1	44,8	88,7	5,8	6,9	1,3	0,3	8,5	67,7	144,5	111,4	39,7	48,31
1.966	65,3	96,5	0,2	64,4	29,1	32,4	5,4	1p	25,6	78,6	90,9	0,6	40,75
1.967	32,8	42,2	17,1	53,2	31,8	11,6	0	0	18,2	41,3	87	1,7	28,08
1.968	1p	79,2	24,2	22,3	9,4	1p	0,5	17	8,4	2,8	60,6	23,6	20,67
1.969	30	73,1	67,2	59,4	46,1	22,7	5,8	5,9	33,2	33,2	66,8	21,1	38,71
1.970	160,1	7,2	4,1	2,2	11,3	11,8	0,5	4,1	0	3,9	33,5	10,9	20,80
1.971	34,9	9,1	53,6	69,3	106	57	10,5	2,6	8,4	11,4	3,1	66,4	36,25
1.972	71,4	81	81,1	1	11,9	2	2,4	INAP	140,6	138,7	97,4	30	55,37
Media Período	49,55	53,98	43,56	36,88	35,29	22,29	4,84	5,15	35,66	59,35	65,60	32,55	

Media anual del período (Media mensual) = 37,05

	Enero	Feb.	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	Annual Medio
1.960	64,4	75,1	44,2	4,9	70,9	27	5,8	9,9	9,4	170,9	54,3	51,2	49,0
1.961	23,4	3,4	12,9	60,9	33,2	6,5	15,8	13,9	60,3	23,2	137,2	55	37,14
1.962	46,3	26,4	89,1	80,4	47,3	30,1	0,0	0,0	45,1	57	26,2	64,9	42,73
1.963	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1.964	5,9	109,8	40,4	18,8	19,6	58,1	11,1	0	11,1	6,7	18,9	55,5	29,66
1.965	60,1	44,8	88,7	5,8	6,9	1,3	0,3	8,5	67,7	144,5	111,4	39,7	48,31
1.966	65,3	96,5	0,2	64,4	29,1	32,4	5,4	1p	25,6	78,6	90,9	0,6	40,75
1.967	32,8	42,2	17,1	53,2	31,8	11,6	0	0	18,2	41,3	87	1,7	28,08
1.968	1p	79,2	24,2	22,3	9,4	1p	0,5	17	8,4	2,8	60,6	23,6	20,67
1.969	30	73,1	67,2	59,4	46,1	22,7	5,8	5,9	33,2	33,2	66,8	21,1	38,71
1.970	160,1	7,2	4,1	2,2	11,3	11,8	0,5	4,1	0	3,9	33,5	10,9	20,80
1.971	34,9	9,1	53,6	69,3	106	57	10,5	2,6	8,4	11,4	3,1	66,4	36,25
1.972	71,4	81	81,1	1	11,9	2	2,4	INAP	140,6	138,7	97,4	30	55,37
Media Período	49,55	53,98	43,56	36,88	35,29	22,29	4,84	5,15	35,66	59,35	65,60	32,55	

Media anual del período (Media mensual) = 37,05

4.2. Número de días

	Enero	Feb.	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	Anual Medio
0	12	16	15	6	10	7	2	2	8	18	12	12	10,0
1	11	4	5	12	11	7	5	5	11	9	20	13	9,42
2	10	5	19	10	10	6	0	0	6	11	10	8	7,92
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	4	12	19	13	6	14	11	0	12	7	4	16	9,83
5	16	10	10	2	5	2	1	1	7	23	12	6	7,92
6	18	19	1	16	8	8	2	1	6	10	6	1	8,00
7	7	9	4	6	6	2	1	3	2	9	16	3	5,67
8	0	19	7	11	12	3	2	3	3	3	13	12	7,33
9	13	12	15	11	17	8	2	3	12	9	11	9	10,17
10	23	9	7	5	10	7	1	2	0	3	14	7	7,33
11	6	4	13	15	19	13	5	2	6	6	2	16	8,91
12	11	16	9	4	5	9	2	0	12	17	11	9	8,75
13	10,91	11,25	10,33	9,25	9,91	7,16	2,83	1,83	7,08	10,41	10,91	9,33	

Media anual del período (Número de días con precipitación) = 8,433